



**Titre:** Véhicules connectés contributions à la communication véhicule-  
Title: réseau mobile et la localisation coopérative

**Auteur:** Ahmed Salim Chekkouri  
Author:

**Date:** 2015

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Chekkouri, A. S. (2015). Véhicules connectés contributions à la communication  
Citation: véhicule-réseau mobile et la localisation coopérative [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2016/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/2016/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Samuel Pierre  
Advisors:

**Programme:** Génie informatique  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

VÉHICULES CONNECTÉS

CONTRIBUTIONS À LA COMMUNICATION VÉHICULE-RÉSEAU MOBILE ET LA  
LOCALISATION COOPÉRATIVE

AHMED SALIM CHEKKOURI

DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE ET GÉNIE LOGICIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIÆ DOCTOR  
(GÉNIE INFORMATIQUE)

DÉCEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

VÉHICULES CONNECTÉS

CONTRIBUTIONS À LA COMMUNICATION VÉHICULE-RÉSEAU MOBILE ET LA  
LOCALISATION COOPÉRATIVE

présentée par : CHEKKOURI Ahmed Salim

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiæ Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

Mme BELLAÏCHE Martine, Ph. D., présidente

M. PIERRE Samuel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. QUINTERO Alejandro, Doctorat, membre

M. ROY Sébastien, Ph. D., membre

## DÉDICACE

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الحمد لله والصلاة والسلام على المبعوث رحمة للعالمين سيدنا محمد وعلى آله وصحبه وإخوانه وحزبه

*À mes parents Omar et Amina*

*À mon épouse Halima pour sa patience et son soutien*

*À mes enfants Ilyes et Mariam*

*À toute ma famille*

*À mes amis*

## REMERCIEMENTS

Au terme de cette thèse, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Prof. Samuel Pierre; qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude pour son encadrement, ses conseils et son support tout au long de ma thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse.

Mes remerciements vont également à mes collègues, aussi bien anciens qu'actuels, du Laboratoire de recherche en Réseautique et Informatique Mobile (LARIM). J'ai passé en leur compagnie de très bons moments et je garde de merveilleux souvenirs. Une mention spéciale va à Abdellatif Ezzouhairi, pour les nombreuses discussions et sa collaboration au niveau technique.

Je présente mes remerciements à mes amis, spécialement Lyes et Aziz pour leur travail de relecture de cette thèse.

Pour tout le personnel du département et de l'école polytechnique, je dis merci pour leur amabilité et l'ambiance chaleureuse à l'école.

Je présente mes remerciements et ma reconnaissance profonde, à mes parents pour leur soutien sans limites, à mon épouse Halima qui était présente au quotidien, autant dans les moments de joie que dans les moments difficiles, à mes frères et sœurs et tous mes amis, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans tous mes efforts.

## RÉSUMÉ

Véhicules connectés, ou « connected vehicles », est un nouveau paradigme des systèmes de transport intelligents (STI) qui vise à améliorer la sécurité et l'efficacité du trafic routier en utilisant les communications sans fil. Les communications des véhicules connectés (ou, V2X) englobent les communications sans fil entre véhicules et infrastructures (V2I), entre véhicule et véhicule (V2V), et entre les véhicules et les dispositifs sans fil (V2D).

Considéré comme la norme de facto pour les communications V2X, le DSRC/WAVE est le principal standard de communication sans fil spécifiquement conçu pour les communications véhiculaires. L'efficacité du DSRC/WAVE pour les communications V2V et V2I a été prouvée par de nombreuses études et bancs d'essai dans le monde réel. En ce qui concerne la communication V2V, le passage au stade de déploiement à grande échelle est prévu à l'horizon 2020. En ce qui a trait à la communication V2I, bien que le déploiement d'une infrastructure DSRC (RSU) soit critique pour plusieurs applications STI, il n'y a toujours pas de plan pour son déploiement à grande échelle, essentiellement en raison de la nécessité d'investissements publics considérables.

Avec les progrès réalisés au niveau des dernières versions du réseau mobile 4G LTE-A, les réseaux mobiles émergent comme l'une des principales technologies pour les communications V2I. En effet, le réseau mobile LTE-A permet aujourd'hui un plus grand débit (100Mb/s - 1Gb/s) avec relativement un faible délai (10ms) grâce à une évolution au niveau de l'architecture du réseau et l'introduction de nouvelles technologies telles que la densification du réseau à l'aide de petites cellules, relais (fixes et mobiles), la connectivité double (Dual Connectivity, DC), l'agrégation de porteuses (Carrier Aggregation, CA), etc.; des évolutions qui ouvrent la voie vers la 5G à l'horizon 2020 avec la promesse d'un débit encore plus élevé (10Gb/s) et d'un plus faible délai (1ms), ce qui renforce ainsi la tendance pour une future intégration véhicule et réseau mobile.

Afin d'atteindre une plus grande efficacité spectrale, les petites cellules sont largement adoptées par les opérateurs de réseaux mobiles, dans les réseaux dits hétérogènes (HetNets), comme une solution clé pour désengorger le trafic au niveau des macrocellules et améliorer la capacité et la couverture du réseau d'accès. Cependant, bien que l'utilisation des petites cellules soit une solution intéressante pour les communications V2I, étant donné leur faible portée, cela provoque des relèves fréquentes qui mènent à une surcharge élevée de signalisation vers le réseau cœur. De plus, étant donné que les petites cellules sont généralement connectées au réseau cœur via une connexion

Internet, celle-ci devient le goulot d'étranglement pour la relève et le transfert de données. D'où l'importance de compléter un maximum de relève localement.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'intégration véhicule infrastructure. L'objectif général est de proposer une architecture pour véhicule connecté basée sur la localisation coopérative, la communication V2I et la gestion de relève pour une meilleure intégration VANET – réseau mobile. Cette thèse fait état de trois principales contributions.

1. La première contribution concerne la proposition d'algorithmes de localisation coopérative, basés sur une approche ensembliste, qui permettent d'améliorer la précision de localisation. Le premier algorithme appelé (CLES) est un algorithme générique pour la localisation coopérative basée sur une approche ensembliste. Le deuxième algorithme, appelé (CLEF), est une application de l'algorithme CLES à la localisation par approche des signatures. De plus, nous caractérisons leur précision en évaluant la réduction du diamètre maximal et l'aire du polygone en fonction de différents paramètres tels que le nombre de polygones, la configuration géométrique, la proximité du nœud par rapport à la frontière de son polygone, et l'incertitude sur les mesures de distances.
2. La deuxième contribution porte sur la sélection des passerelles mobiles pour connecter efficacement les véhicules aux petites cellules du réseau mobile. Nous formulons le problème de sélection des passerelles mobiles sous forme d'un problème de programmation linéaire binaire multi-objectif (MO-BIP). Ensuite, nous évaluons l'efficacité de l'algorithme au niveau du temps de calcul pour différents degrés de connectivité et un nombre variable de véhicules.
3. La troisième contribution concerne la gestion de la relève dans les petites cellules du réseau mobile (LTE-A) afin de supporter efficacement les communications des véhicules connectés et réduire la surcharge de signalisation vers le réseau cœur. Pour ce faire, nous proposons un nouveau schéma basé sur le transfert local de trafic en utilisant les liens X2 et les nœuds d'ancrage. Trois procédures sont proposées, à savoir: 1) intra-domaine, 2) inter-domaines, 3) et K-sauts inter-domaines. Ensuite, en utilisant un modèle analytique, nous évaluons l'efficacité du schéma proposé.

## ABSTRACT

Connected Vehicles are a new intelligent transportation paradigm that uses wireless communications to improve traffic safety and efficiency. It has received a great deal of attention in recent years, across many communities. While the DSRC is widely recognized as the de facto standard for V2V, other wireless technologies are required for large-scale deployment of V2I communications. Thanks to its high data rates and large scale deployment, the LTE-A enhanced by small cells densification, is positioned as one of the major candidate technologies for V2I communications. However, using LTE-A small cells for V2I communications is challenging due to their small coverage which lead to frequent handoffs and more signaling overhead.

Thanks to recent advances in LTE-A Releases-10/11/12, the 4G LTE-Advanced (LTE-A) mobile network appears as one of the major candidate technologies for V2I communications. In fact, the LTE-A promises to deliver reduced connection setup time and lower latency (10ms) and higher data rates (up to 1Gbps) by using new physical layer technologies and new network elements and functions such as, network densification using Small Cells (SCs), Dual Connectivity (DC), Relaying functionality, Carrier Aggregation (CA), Device to Device (D2D) communication, etc.; developments that pave the way to 5G in the Horizon 2020, with the promise of an even higher data rates (more than 10 Gbps) and even much lower latency (1ms), which reinforces the trend for future integration between VANET and mobile networks for V2I communications.

Although the macrocell will remain the major Radio Access Network (RAN) element for wide-area coverage and high-mobility users, it is no longer sufficient to meet user's demand in many high-density areas. Indeed, due to the proliferation of mobile devices and applications, mobile data demand continues to grow exponentially. Small cells, which include microcells, picocells, and femtocells, are widely recognized as a key solution for enhancing RAN capacity and coverage. They are increasingly used by mobile operators, in the so-called Heterogeneous Network (HetNet), to offload traffic from their macrocells. A HetNet is typically composed of several layers (macrocells, small cells), and in some cases different access technologies (e.g., LTE-A, UMTS, WiFi). SCs densification involves deploying more small coverage base stations in high demand areas to bring higher spectral efficiency per coverage area.

Nevertheless, the SCs deployment faces a number of problems relevant to mobility handling that have to be addressed. More specifically, the use of SCs with limited coverage causes frequent



handovers that lead to high signaling overhead toward the core network. In addition, since the small cells are generally connected to the EPC via a network Internet connection, this one becomes the bottleneck for handovers and data forwarding, hence the importance of completing a maximum of handover locally.

This thesis therefore aims to propose solutions for VANETs and mobile networks integration. The main contributions of this thesis are summarized as follows:

The first contribution concerns the proposed cooperative localization algorithms, based on a set-membership approach which improves the location accuracy. The first algorithm called (CLES) is a generic algorithm for cooperative localization based on a set-membership approach. The second algorithm called (CLEF) is an application of CLES algorithm to fingerprinting localization. In addition, we characterize their accuracy by evaluating the reduction of the maximum diameter and the area of the polygon depending on various parameters such as the number of polygons, the geometric configuration, the nearest node in relation to the boundary of the polygon, and the uncertainty of distance measurements.

The second contribution concerns the selection of mobile gateways to effectively connect vehicles to small cells of the mobile network. In fact, while each vehicle may directly uses its LTE-A interface for V2I communications, we argue that by selecting a limited number of GWs, we can effectively reduce the mobility signaling overhead. Hence, we propose a new network-based mobile gateway selection scheme with one-hop clustering to efficiently relay the traffic from neighbouring vehicles toward the serving SC. The selection problem is formulated as a multi-objective binary linear programming problem. Using linear programming solver, we show that, for realistic number of vehicles per small cell and GW connectivity degree, the execution time is relatively short.

As a third contribution of this thesis, we focus on challenges relevant to mobility for VANETs using LTE-A network. Specifically, a novel architecture that integrates VANET and 4G LTE-A Heterogeneous Network for enhanced mobility in LTE-A small cells is introduced. First, we propose a new network-based mobile gateway selection scheme with one-hop clustering to efficiently relay traffic from neighbouring vehicles toward the serving SC. The problem is formulated as a multi-objective binary programming problem. Then, for seamless mobility of connected vehicles, we propose a local k-hops anchor-based mobility scheme with three

procedures, namely intra-domain, k-hops inter-domain and inter-domain procedures. Numerical results show the effectiveness of the proposed mobility schemes for reducing the generated signaling load towards the core network.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VII
TABLE DES MATIÈRES .....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES FIGURES.....	XVI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XVIII
LISTE DES ANNEXES.....	XXI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....	1
1.1 Motivations.....	2
1.2 Éléments de la problématique .....	3
1.2.1 Communications et gestion de la mobilité pour des véhicules connectés.....	3
1.2.2 Localisation .....	5
1.3 Objectifs de recherche.....	7
1.4 Esquisse méthodologique.....	8
1.5 Principales contributions et originalité.....	9
1.6 Plan de la thèse.....	10
CHAPITRE 2 COMMUNICATION SANS FIL POUR VÉHICULE CONNECTÉ .....	12
2.1 DSRC / WAVE pour les véhicules connectés.....	12
2.1.1 Vue d'ensemble sur DSRC / WAVE .....	12
2.1.2 Modèle de référence OSI pour DSRC/WAVE.....	14
2.1.3 Déploiement du DSRC/WAVE.....	16

2.2	Réseaux mobiles pour les véhicules connectés .....	17
2.2.1	Réseau LTE / LTE-A .....	18
2.2.2	Les petites cellules LTE-A .....	19
2.3	Gestion de la mobilité .....	20
2.3.1	Relève et rapport de mesure .....	22
2.3.2	Procédure de relève .....	23
2.3.3	Mobilité et réseau auto-organisé .....	26
CHAPITRE 3 LOCALISATION .....		28
3.1	Revue des principales techniques de localisation .....	28
3.1.1	Étapes pour l'estimation de la position .....	28
3.1.2	Localisation globale par GNSS .....	29
3.1.3	Méthode de puissance du signal (RSS) .....	31
3.1.4	Localisation par temps d'arrivée (TOA) .....	32
3.1.5	Localisation par différence de temps d'arrivée (TDOA) .....	32
3.1.6	Mesure par angle d'arrivée (AOA) .....	33
3.1.7	Approche des signatures .....	34
3.1.8	Localisation coopérative .....	36
3.2	Techniques d'estimation de la position .....	37
3.2.1	Algorithmes de localisation distribués .....	37
3.2.2	Algorithmes de localisation centralisée .....	39
3.3	Erreurs de localisation .....	41
3.3.1	Définitions .....	41
3.3.2	Modélisation des incertitudes .....	42
3.3.3	Évaluation des erreurs .....	43

3.4	Sources d'incertitudes de localisation .....	45
3.4.1	Facteurs liés au canal de transmission.....	45
3.4.2	Affaiblissement géométrique de précision (GDOP) .....	46
CHAPITRE 4 LOCALISATION COOPÉRATIVE BASÉE SUR APPROCHE ENSEMBLISTE.....		47
4.1	Introduction .....	47
4.2	Revue de littérature .....	49
4.2.1	Localisation par approche ensembliste .....	49
4.2.2	Localisation par approche des signatures.....	50
4.3	Formulation du problème .....	51
4.4	Description de l'algorithme CLES .....	52
4.4.1	Réduction des polygones basée sur les distances maximales .....	53
4.4.2	Réduction des polygones basée sur les distances minimales .....	55
4.5	Méthodologie pour l'évaluation des algorithmes CLES et CLEF. ....	57
4.5.1	Paramètres d'évaluation .....	57
4.5.2	Algorithme CLES.....	57
4.5.3	Algorithme CLES et Signatures de Signal.....	58
4.6	Résultats et analyse .....	60
4.7	Conclusion.....	67
CHAPITRE 5 SÉLECTION DYNAMIQUE DES PASSERELLES POUR SUPPORT DE LA MOBILITÉ DANS LES PETITES CELLULES .....		69
5.1	Revue de littérature .....	70
5.2	Algorithme de sélection des passerelles mobiles .....	71
5.2.1	Phase de collecte des données.....	71
5.2.2	Phase de sélection.....	73

5.2.3	Temps de séjour dans le champ de communication de la passerelle .....	75
5.2.4	Formulation de l'algorithme de sélection des passerelles LTE-A .....	77
5.3	Analyse du temps de calcul .....	79
5.4	Conclusion.....	80
CHAPITRE 6 ARCHITECTURE INTÉGRÉE VANET-LTE-A POUR LA GESTION DE MOBILITÉ DANS LES PETITES CELLULES .....		82
6.1	Introduction .....	82
6.2	Revue de littérature .....	84
6.2.1	Problématique.....	85
6.2.2	Procédure de mobilité intra-domaine .....	87
6.2.3	Procédure de mobilité k-sauts inter-domaine.....	89
6.2.4	Procédure de mobilité inter-domaine .....	89
6.2.5	Procédure de mobilité inter-domaine .....	90
6.3	Modèle analytique .....	92
6.3.1	Préliminaire et notation .....	92
6.3.2	Analyse du coût total de signalisation.....	94
6.3.3	Le coût total de signalisation d'AMS sans mise en grappes .....	94
6.3.4	Estimation de la charge avec mise en grappes .....	97
6.3.5	Coût total de la signalisation de la procédure de mobilité de 3GPP .....	98
6.4	Analyse des performances.....	99
6.5	Conclusion.....	103
CHAPITRE 7 CONCLUSION.....		105
7.1	Revue des principales contributions.....	105
7.2	Limitations des travaux .....	107
7.3	Travaux futurs .....	108

BIBLIOGRAPHIE .....	111
ANNEXE .....	120

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Corrélation entre les paramètres.....	63
Tableau 4.2 Résultats de simulation de l’algorithme CLEF .....	67
Tableau 6.1 Notation .....	96
Tableau 6.2 Expression des coûts de signalisation .....	98
Tableau 6.3 Paramètres des simulations .....	99
Tableau A.1 Plages de puissance du signal.....	121



## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Architecture simplifiée du réseau LTE-A avec petites cellules HeNB [65] .....	20
Figure 2.2 Relèves dans un réseau hétérogène (HetNet) LTE-A .....	21
Figure 2.3 Procédure de relève - phase de préparation .....	23
Figure 2.4 Procédure de relève - phase d'exécution .....	24
Figure 2.5 Procédure de relève - phase d'achèvement.....	25
Figure 3.1 Méthode à deux étapes pour l'estimation de la position.....	29
Figure 3.2 Schéma de localisation par approche des signatures standard.....	34
Figure 3.3 Localisation coopérative entre deux mobiles [93] .....	36
Figure 3.4 Exemples d'affaiblissement géométrique de précision .....	46
Figure 4.1 Domaines de présence et contraintes de distances.....	51
Figure 4.2 Organigramme de l'algorithme CLES .....	53
Figure 4.3 Réduction de polygone basée sur la distance maximale.....	54
Figure 4.4 Réduction de polygone basée sur la distance minimale .....	56
Figure 4.5 Scénario pour étudier l'algorithme CLES. ....	58
Figure 4.6 Scénario avec 4 polygones.....	58
Figure 4.7 Génération des polygones qui représentent les signatures de signal .....	59
Figure 4.8 Impact de HDOP sur la réduction de l'aire du polygone de présence. ....	60
Figure 4.9 Impact de HDOP sur la réduction du diamètre de polygone .....	61
Figure 4.10 Impact de HDOP sur la réduction du diamètre de polygone .....	62
Figure 4.11 Influence de la proximité de la frontière.....	62
Figure 4.12 Impact du nbr. de polygones sur la réduction de l'aire du polygone de présence pour différentes précisions de mesures des distances .....	63
Figure 4.13 Impact du nbr. de polygones sur la réduction du diamètre du polygone de présence pour différentes précisions de mesures de distances .....	64

Figure 4.14 Fonction de répartition (CDF) de l'erreur de positionnement de l'algorithme CLEF pour un nombre de nœuds variable. ....	65
Figure 4.15 Fonction de répartition (CDF) de l'erreur de positionnement de l'algorithme CLEF pour différentes valeurs de l'erreur de mesure de la distance. ....	66
Figure 5.1 Schéma d'une carte de niveau RSRP basée sur l'évanouissement macroscopique "Macroscopic fading" .....	73
Figure 5.2 Temps de résidence pour différentes portées.....	76
Figure 5.3 Temps de résidence pour différents niveaux de vitesses relatives.....	76
Figure 5.4 Temps de calcul pour l'algorithme de sélection en fonction du nombre de véhicules et du degré de connectivité.....	80
Figure 6.1 Architecture VANET-LTE-A proposée.....	83
Figure 6.2 Procédure de gestion de relève 3GPP HeNB [7] .....	86
Figure 6.3 Procédure de mobilité d'ancrage intradomaine: type (a).....	88
Figure 6.4 Procédure de HO k-sauts inter-domaine : type (b) .....	90
Figure 6.5 Procédure de HO inter-domaine de type (c). ....	91
Figure 6.6 Scénario de relève d'un véhicule dans une autoroute urbaine.....	92
Figure 6.7 Diminution de la charge de signalisation en fonction du nombre de véhicules par grappe .....	100
Figure 6.8 Impact de la vitesse des véhicules sur la charge de signalisation.....	101
Figure 6.9 Impact du nombre d'unités d'ancrage sur la charge de signalisation .....	102
Figure 6.10 Impacte du taux d'arrivée des sessions sur la charge de signalisation .....	103
Figure A.1 Plan du 3e étage du pavillon Lassonde utilisé dans HeatMapper .....	120
Figure A.2 Exemples de relevés pour deux points d'accès Wi-Fi .....	121

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

2G	2nd Generation
3G	3rd Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4th Generation
5G	5th Generation
AMS	Anchor Mobility Scheme
AMU	Anchor Mobility Unit
AOA	Angle of Arrival (Angle d'Arrivé)
AP	Access Point (Point d'Accès)
CDF	Cumulative Density Function (Fonction de répartition)
CLEF	Cooperative Localization with Enhanced Fingerprinting
CLES	Cooperative Localization with Enhanced Set-membership
CQI	Channel Quality Indicator
D2D	Device to Device
dB	Decibel
dBm	Decibel par rapport à 1mW
DC	Dual Connectivity
DOA	Direction Of Arrival
DSRC	Dedicated Short Range Communications
eNB	enhanced Node B
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
GDOP	geometric dilution of precision
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GW	Gateway (passerelle)
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HeNB	Home enhanced Node B
HO	Handover, Handoff (relève)
IEEE	Institut of Electrical and Electronics Engineers

IEEE802.11	Standard du réseau WLAN
INS	Inertial Navigation System
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunications Union
ITU-R	International Telecommunications Union-Radio communications
LIDAR	light (laser) detection and ranging
LOS	Line-Of-Sight (Ligne de Vue Directe)
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
MAC	Medium Access Control (Méthode d'Acces au Medium)
MANET	Mobile Ad hoc NETwork
MME	Mobility Management Entity
NLOS	No-Line-Of-Sight (Ligne de Vue Indirecte)
OBU	On Board Unit
OSI	Open System Interconnection
PA-RSRP	Predicted Average-RSRP
PDF	Probability Density Function (Fonction de Densité de Probabilité)
QoS (QoS)	Qualité de Service (Quality of Service)
RAN	Radio Access Network
RF	Radio Frequency
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSS	Receive Signal Strength (Puissance du Signal Recu)
RSSI	Receive Strength Signal Indicator
RSU	Road Side Unit
RTT	Round Trip Time
SC	Small Cell
S-GW	Serving Gateway
SMR	Session to Mobility Ratio
SON	Self optimizing/organizing Network

	Système de Transport Intelligent (Intelligent Transportation Systems)
STI (ITS)	
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UWB	Ultra-wideband
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
VANET	Vehicular Ad hoc Networks
WAVE	Wireless Access for Vehicle Environments
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network

## LISTE DES ANNEXES

Annexe A - Mesures de signatures du signal .....	120
--	-----

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

Face à l'évolution des besoins en matière de transports, les technologies classiques de gestion du transport sont devenues de plus en plus inefficaces. De nombreuses études considèrent la mise en œuvre de système de transport intelligent (STI, « ITS ») comme un élément essentiel d'une infrastructure pouvant répondre aux besoins futurs du transport avec des coûts raisonnables [47]. En utilisant les communications sans fil et les systèmes de localisation de pointe, les STIs permettront la mise en œuvre de nouvelles solutions intelligentes fondées sur l'interaction entre le conducteur, le véhicule et l'environnement routier. Dans cette vision, les dispositifs embarqués autonomes sont complétés par les communications sans fil, d'où l'émergence du concept véhicule connecté.

Véhicule connecté, ou « connected vehicle », est un nouveau paradigme des systèmes de transport intelligents qui vise à améliorer la sécurité et l'efficacité du trafic routier en utilisant les communications sans fil. Les communications des véhicules connectés (ou, V2X) englobent les communications sans fil entre véhicules et infrastructures (V2I), entre véhicule et véhicule (V2V), et entre les véhicules et les dispositifs sans fil (V2D).

Au cours de la dernière décennie, le paradigme véhicule connecté a suscité un grand intérêt au niveau académique, des gouvernements (autorités de Transport), des industriels (télécoms, constructeurs de véhicules, etc.) ainsi que des organismes de normalisation (IEEE, l'ETSI, ASTM, SAE, ISO, etc.). La synergie entre ces acteurs a conduit à de nombreux projets de recherche et développement collaboratifs à travers le monde, tels que IntelliDrive (USA), CVIS (Europe), le AHS (Japon), et également à établir plusieurs consortiums (VIIC, C2C-CC, etc.) qui contribuent au développement et promotion des systèmes V2X [48] [49].

L'interaction entre le véhicule et l'environnement routier est au cœur de nombreuses applications STI. Cela nécessite le développement de systèmes de communication V2X performants et de systèmes de positionnement de plus grande précision [46].

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude de la localisation coopérative et la gestion de mobilité dans les réseaux mobiles avec application dans le domaine des véhicules connectés. Dans ce chapitre d'introduction, nous présentons d'abord les concepts de communication et de localisation.

Puis, nous enchaînons avec les éléments de la problématique, suivis des objectifs, de la méthodologie de recherche et d'une synthèse des principales contributions. Le plan de la thèse est finalement esquissé.

## 1.1 Motivations

Les communications V2X sont aujourd'hui à la base d'un grand nombre d'applications STI [45] [47]. On distingue les applications de sécurité routière dites « vitales », et les applications dites « non vitales ».

La motivation principale derrière le développement des communications V2X est les applications de sécurité routière. En effet, l'échange d'informations sur l'environnement routier permet une meilleure évaluation des dangers, d'optimiser les dispositifs de sécurité et de fournir de l'assistance aux usagers de la route. La mise en œuvre de tels systèmes permettra de réduire considérablement les pertes de vies humaines et les dommages corporels et matériels causés par les accidents [50]. Si on prend l'exemple des systèmes pour prévenir les collisions aux intersections (Intersection Collision Avoidance Systems, CICA), les études [50] révèlent que 80% des collisions seraient évitées si 50% des intersections étaient équipées d'unités de communication sans fil, appelées également unité sur le bord de la route (Road Side Unit, RSU), tandis que 50% des collisions seraient évitées si seulement 20% des intersections étaient équipées des RSU.

Dans la catégorie des applications de sécurité routière, on distingue les applications de type V2I, dont on cite par exemple : les feux de signalisation intelligents, la signalisation routière, les services pour véhicules prioritaires (ex. ambulance), les systèmes pour prévenir les collisions aux intersections, communication capteurs véhicules, etc. Pour les applications de type communications V2V, on cite par exemple : assistance pour le changement de voie, avertissement véhicule à véhicule par rapport aux conditions routières, etc.

Dans la catégorie des applications non dédiées à la sécurité, on cite par exemple : la gestion intelligente du trafic routier, la gestion de l'infrastructure routière, la tarification routière intelligente, le paiement électronique (Electronic Toll Collection), la navigation avec optimisation de l'itinéraire et l'estimation du trafic en temps réel. [51].



Au niveau de l'importance de la localisation pour l'optimisation des réseaux mobiles, la possibilité de prédire la qualité du signal au niveau de la zone de couverture de la cellule est très utile pour une gestion efficace des ressources du réseau mobile. Aujourd'hui, lors de la planification et l'optimisation des réseaux mobiles, les opérateurs utilisent souvent des outils de planification dont la précision dépend des modèles de propagation et nécessitent la collecte des relevés de signal en conduite/marche. Ces relevés s'avèrent un exercice coûteux en ressources et en temps, en plus ils ne couvrent qu'une partie limitée de la zone couverte par le réseau. Afin de surmonter ces difficultés, les unités mobiles UEs peuvent être utilisées pour collecter et transmettre continuellement les mesures de signal (ex. RSRP) avec leurs positions [39]. Ces mesures corrélées avec les positions permettent de construire une carte de niveau du signal qui peut être utilisée pour optimiser les fonctions du réseau mobile, telles que les fonctions de réseau auto-organisé (SON), pour l'optimisation de la relève, la couverture, la capacité et la qualité de service [39].

## **1.2 Éléments de la problématique**

### **1.2.1 Communications et gestion de la mobilité pour des véhicules connectés**

Le DSRC/WAVE (Dedicated Short Range Communications/Wireless Access for Vehicle Environments) ou « liaison radio spécialisée de courte portée » [53] est un standard de communications sans fil spécifiquement conçu pour les communications véhiculaires. L'efficacité du DSRC/WAVE pour les communications V2V et V2I a été prouvée par de nombreuses études et bancs d'essai dans le monde réel. En ce qui concerne la communication V2V, le passage au stade de déploiement à grande échelle est plus proche que jamais, particulièrement avec la décision du département américain des Transports (DOT) de rendre obligatoire la technologie V2V dans toutes les nouvelles voitures [54]. En ce qui a trait à la communication V2I, bien que le déploiement d'une infrastructure DSRC (RSU) soit critique pour plusieurs applications STI, les coûts de déploiement d'une telle infrastructure ont pour conséquence de freiner son déploiement à grande échelle.

Par ailleurs, le succès commercial des réseaux cellulaires mobiles a favorisé l'émergence de nouvelles normes qui bénéficient d'une évolution permanente sous l'égide du consortium 3GPP (3rd Generation Partnership Project) tel que le réseau mobile de 4G LTE suivi du 4G LTE-A (Long Term Evolution - Advanced). Avec les progrès réalisés au niveau des dernières versions

du LTE-A (à partir de la version 10), le réseau mobile LTE-A émerge comme l'une des principales technologies candidates pour les communications V2I [19]. En effet, le LTE-A promet un plus grand débit avec de faibles délais grâce à l'introduction de nouvelles technologies telles que la densification du réseau à l'aide de petites cellules, relais (fixes et mobiles), la connectivité double (Dual Connectivity, DC), l'agrégation de porteuses (Carrier Aggregation, CA), la communication périphérique à périphérique (D2D), MIMO massive, etc.; des évolutions qui ouvrent la voie vers la 5G à l'horizon 2020 avec la promesse d'un débit encore plus élevé (10Gb/s) et d'un plus faible délai (1ms), ce qui renforce ainsi la tendance pour une future intégration véhicule connecté et réseau mobile.

Bien que les macrocellules restent les principaux éléments du réseau d'accès capables d'offrir une couverture étendue et supporter des utilisateurs à grande vitesse, elles ne sont plus suffisantes pour répondre à la forte demande des utilisateurs dans les régions à grande densité. En effet, en raison de la prolifération des appareils et des applications mobiles, la demande de données mobiles continue de croître de façon exponentielle [28]. Vu la limite du spectre des fréquences radioélectriques disponibles, il devient primordial d'améliorer l'efficacité spectrale.

L'efficacité spectrale peut être définie comme étant le débit total disponible par unité de surface. Afin d'atteindre une plus grande efficacité spectrale, on peut soit améliorer l'efficacité de codage et de modulation soit augmenter la densité de cellules. Cependant, pour avoir une amélioration significative de la capacité du réseau d'accès, l'augmentation de la densité des cellules (densification) en utilisant les petites cellules reste le choix le plus pertinent. Les petites cellules (Small Cells, SCs) sont des stations de base de faible puissance, dont la portée radio varie de quelques dizaines de mètres à des centaines de mètres. Le terme « petite cellule » englobe microcellule, picocellule et femtocellule. Aujourd'hui, les SCs sont largement reconnues et adoptées par les opérateurs de réseaux mobiles, dans les réseaux dits hétérogènes (Hetnet), comme une solution clé pour désengorger le trafic (traffic offloading) au niveau des macrocellules et améliorer la capacité et la couverture du réseau d'accès.

Cependant, bien que l'utilisation des petites cellules soit une solution intéressante pour les communications V2I, étant donné leur faible portée, cela provoque des relèves fréquentes qui mènent à une surcharge élevée de signalisation vers le réseau cœur. De plus, étant donné que les petites cellules sont généralement connectées au réseau cœur via une connexion Internet, celle-ci

devient le goulot d'étranglement pour la relève et le transfert de données, d'où l'importance de compléter un maximum de relève localement. L'utilisation des nœuds et domaines d'ancrage pour la gestion locale de la relève constitue un élément de solution [10] [27]; le problème reste néanmoins posé lorsque le taux de franchissement de la frontière des domaines d'ancrage est important en raison de la petite taille du domaine d'ancrage ou de l'augmentation de la vitesse des mobiles.

Par ailleurs, même si chaque véhicule peut utiliser directement son interface LTE-A pour les communications V2I, l'agrégation du trafic des véhicules voisins vers un certain nombre de véhicules passerelles constituerait un autre élément de solution pour réduire la charge de signalisation de la relève. De plus, l'utilisation des passerelles mobiles procure d'autres avantages comme l'extension de la couverture des petites cellules en utilisant la communication V2V, la réduction du nombre de mobiles connectés par SC et la réduction de la congestion V2V DSRC en déchargeant le trafic V2V tolérant au délai (delay-tolerant traffic).

### **1.2.2 Localisation**

La capacité du nœud à se localiser relève une importance critique pour un grand nombre d'applications et de services, tels que le transport intelligent, la gestion des réseaux mobiles (ex. gestion de la mobilité, routage basé sur la localisation, etc.), la localisation de personnes, de biens et de marchandises, etc.

Cependant, malgré les récents développements dans le domaine, l'amélioration des techniques de localisation au niveau de la précision et de la couverture demeurent toujours des problèmes ouverts, présentant plusieurs défis qui limitent la mise en œuvre de nouvelles applications et de nouveaux services.

Il existe aujourd'hui diverses technologies pour la localisation (intérieure, extérieure), nous citons par exemple : les systèmes de localisation globale (localisation extérieure) GNSS « Global Navigation Satellite Systems » avec ou sans unité inertielle INS « Inertial Navigation System », les systèmes de localisation relative basés sur les systèmes radiofréquences (réseaux cellulaires, WLAN « Wireless Local Area Network », UWB), utilisant des techniques telles que la puissance de signal RSS « Radio Signal Strength », le temps d'arrivée TOA « Time Of Arrival », la différence de temps d'arrivée TDOA « Time Difference Of Arrival », l'angle d'arrivée AOA « Angle Of

Arrival», l'approche des signatures « Fingerprinting », la localisation coopérative. Chacune de ces catégories présente ses propres avantages et limites par rapport à la précision, la fiabilité, le coût, le déploiement (intérieure/extérieure), etc.; cependant, l'approche des signatures et la localisation coopérative présentent un intérêt bien particulier.

L'avantage principal de l'approche des signatures est qu'elle ne nécessite pas une infrastructure dédiée pour la localisation. En effet, cette technique exploite les signaux des réseaux sans fil déjà déployés (WLAN, cellulaire, etc.) ; par conséquent, elle n'exige pas la modification au niveau matériel, que ce soit au niveau du réseau ou de l'unité mobile. Par ailleurs, la localisation par signatures présente également certaines limites. En effet, en plus du problème de précision de localisation, la mise à jour de la base de données des signatures est généralement faite hors ligne et elle n'est pas automatique, elle nécessite généralement l'intervention d'un opérateur dans le processus de collecte de données signature – position, et du calibrage et recalibrage de la base de données quand il y a un changement majeur dans l'environnement de propagation, ce qui rend le processus long et coûteux.

La localisation coopérative (LC) suscite depuis quelques années, un intérêt grandissant pour la localisation dans les réseaux mobiles et les réseaux véhiculaires. Contrairement aux techniques de localisation standards, où chaque nœud a besoin d'un accès direct au signal de la station référence (balise dont la position est prédéterminée), la localisation coopérative utilise les positions relatives entre les nœuds, ce qui permet d'améliorer la précision de localisation et la couverture. Dans le cas mobile, cette technique peut être décrite comme étant une technique opportuniste, qui permet de saisir l'occasion d'une bonne configuration géométrique des nœuds pour améliorer la précision de localisation. Plusieurs facteurs peuvent influencer la performance de LC [55], tels que les techniques d'estimation de la position, la géométrie du réseau (GDOP/HDOP), en plus des facteurs liés au signal et au canal de transmission (ex. trajets multiples, NLOS). Au niveau du volet localisation de cette thèse, on s'intéresse aux premières catégories de facteurs, le traitement des problématiques liées au signal et au canal de transmission sort du cadre de ce projet.

Afin de profiter des avantages de la localisation coopérative et de l'approche des signatures, nous soutenons qu'elles peuvent être utilisées d'une façon complémentaire. En effet, dans la phase de collecte des couples signature – position, l'unité mobile peut saisir l'opportunité d'une bonne configuration géométrique des nœuds et la bonne précision des distances inter-nœuds, pour la mise

à jour des signatures dans la base de données (BD). Par ailleurs, durant la phase de localisation, les polygones (données signature- position) peuvent être utilisés dans la localisation coopérative.

Notons finalement que pour l'estimation de la position, ces méthodes de localisation peuvent s'appuyer sur des approches probabilistes ou bien des approches ensemblistes. L'avantage des approches ensemblistes est qu'elles n'exigent pas la connaissance de la fonction de densité de probabilité (PDF) de la position, la seule condition est que le bruit soit borné.

En guise de conclusion de cette section, nous pouvons définir les éléments de la problématique liés aux volets localisation coopérative, communication V2I et la gestion de relève dans le contexte des véhicules connectés. Ces éléments peuvent être résumés au niveau des questions suivantes :

- Comment améliorer la précision de localisation en utilisant la localisation coopérative basée sur une approche ensembliste et la localisation par approche des signatures?
- Comment choisir les passerelles mobiles pour connecter efficacement les véhicules aux petites cellules du réseau mobile?
- Comment gérer efficacement la relève dans les petites cellules du réseau mobile LTE-A afin de réduire la charge de signalisation vers le réseau cœur?

### 1.3 Objectifs de recherche

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'intégration véhicule infrastructure. L'objectif général est de proposer une architecture pour véhicule connecté basée sur la localisation coopérative, la communication V2I et la gestion de relève pour une meilleure intégration VANET – réseau mobile. Plus spécifiquement, cette thèse vise les objectifs suivants:

- Proposer des algorithmes de localisation coopérative capables d'améliorer la précision de localisation. Ces algorithmes seront basés sur une approche ensembliste avec application à la localisation par approche des signatures.
- Proposer un algorithme de sélection des passerelles mobiles pour connecter efficacement les véhicules aux petites cellules du réseau mobile. L'agrégation du trafic des véhicules voisins vers un certain nombre de véhicules passerelles apportera de nombreux avantages pour la communication V2I, telle que la réduction de la charge de signalisation pour la

gestion de relève, l'extension de la couverture des petites cellules en utilisant la communication V2V et la limite du nombre de mobiles connectés par SC.

- Proposer un schéma de mobilité basé sur les nœuds d'ancrage (anchor mobility scheme, AMS) et les liens X2 pour le transfert local du trafic afin de réduire la charge de signalisation vers le réseau cœur.

## 1.4 Esquisse méthodologique

Nous commençons cette thèse par une revue de littérature couvrant les travaux liés à la localisation et les communications sans fil dans le contexte des systèmes de transport intelligent. Ceci nous permet de mieux connaître l'étendue de ce domaine de recherche, à savoir les diverses approches qui existent dans le domaine, d'analyser leurs limites et d'identifier les problèmes qui restent ouverts.

Suite à cette étape, nous définissons notre objectif général et retenons un certain nombre de problématiques qui constituent des objectifs spécifiques pour cette thèse. Dans ce qui suit, nous présentons une esquisse de la méthodologie que nous adoptons pour arriver à nos objectifs de chacun des volets de cette thèse.

Dans le volet localisation, une fois qu'on a identifié les enjeux majeurs de la localisation intérieure\extérieure, nous allons proposer deux nouveaux algorithmes de localisation coopérative basés sur une approche ensembliste. Afin d'évaluer les performances de ces deux algorithmes, nous caractérisons leur précision en évaluant la réduction du diamètre maximal et l'aire du polygone en fonction de différents paramètres tels que le nombre de polygones, la configuration géométrique (HDOP, Horizontal Dilution Of Precision), la proximité du nœud par rapport à la frontière du polygone, et l'incertitude de la précision des mesures de distances. Pour ce faire, nous avons développé sous python un programme pour la simulation de nos deux algorithmes. Afin de générer des données réalistes, nous avons effectué des mesures de signatures de signal (des points d'accès Wi-Fi) dans un environnement intérieur, en utilisant le logiciel HeatMapper de la compagnie Ekahau [56]. Ce logiciel permet de créer une carte détaillée de la couverture Wi-Fi et d'enregistrer la puissance du signal de chaque point d'accès ainsi que sa position sur la carte. Nous exploitons par la suite ces données pour l'évaluation des algorithmes en utilisant notre simulateur.

Dans le volet 2, nous nous intéressons à la sélection efficace des passerelles mobiles afin de relayer le trafic de véhicules vers les petites cellules voisines. Pour ce faire, nous formulons le problème de sélection des passerelles mobiles sous forme d'un problème de programmation linéaire binaire multi-objectif (MO-BIP). Ensuite, afin d'évaluer le temps de calcul pour différents degrés de connectivité et un nombre de véhicules variable, nous programmons sous python notre modèle en utilisant l'API du solveur de programmation linéaire GUROBI [57].

Toujours dans le cadre de l'architecture de véhicules connectés, dans le volet 3, nous nous intéressons aux défis relatifs à la gestion de la relève dans les petites cellules. En effet, l'utilisation des petites cellules avec une couverture limitée provoque des relèves fréquentes qui mènent à une surcharge élevée de signalisation vers le réseau cœur. En nous basant sur l'analyse des limites au niveau des solutions déjà introduites et sur les spécifications et recommandations d'organismes tels que le 3GPP, ESTI, nous proposons dans ce volet un nouveau schéma basé sur le transfert local de trafic en utilisant les liens X2 et les nœuds d'ancrage. Pour ce faire, les petites cellules sont divisées en plusieurs grappes (*clusters*) où chaque grappe contient une petite cellule choisie comme nœud d'ancrage local. Trois procédures sont proposées, à savoir: 1) intra-domaine, 2) inter-domaines et 3) K-sauts inter-domaines. Afin d'évaluer l'efficacité du schéma de mobilité proposé, nous développons un modèle analytique et nous comparons nos résultats avec ceux de l'approche 3GPP standard.

## 1.5 Principales contributions et originalité

Comme contribution à l'architecture intégrée VANET-réseau mobile pour véhicule connecté, cette thèse fait des contributions originales dans le domaine de la localisation coopérative, la communication V2I, et la gestion de la relève dans les petites cellules. Trois principales contributions peuvent être considérées et sont résumées ci-après.

La première contribution concerne la proposition d'algorithmes de localisation coopérative, basés sur une approche ensembliste, qui permet d'améliorer la précision de localisation. Le premier algorithme appelé (CLES) est un algorithme générique pour la localisation coopérative basée sur une approche ensembliste qui s'adapte aux différents contextes (localisation intérieure et extérieure). Le deuxième algorithme appelé (CLEF), est une application de l'algorithme CLES à

la localisation par approche des signatures. De plus, nous caractérisons leur précision en évaluant la réduction du diamètre maximal et l'aire du polygone en fonction de différents paramètres tels que le nombre de polygones, la configuration géométrique, la proximité du nœud par rapport à la frontière de son polygone, et l'incertitude sur les mesures de distances.

La deuxième contribution porte sur la sélection des passerelles mobiles pour connecter efficacement les véhicules aux petites cellules du réseau mobile. Nous formulons le problème de sélection des passerelles mobiles sous forme d'un problème de programmation linéaire binaire multiobjectif (MO-BIP). Ensuite, nous évaluons l'efficacité de l'algorithme au niveau du temps de calcul pour différents degrés de connectivité et un nombre de véhicules variable.

La troisième contribution concerne la gestion de la relève dans les petites cellules du réseau mobile (LTE-A) afin de supporter efficacement les communications des véhicules connectés et réduire la surcharge de signalisation vers le réseau cœur. Pour ce faire, nous proposons un nouveau schéma basé sur le transfert local de trafic en utilisant les liens X2 et les nœuds d'ancrage. Trois procédures sont proposées, à savoir: 1) intra-domaine, 2) inter-domaines, 3) et K-sauts inter-domaines. Ensuite, en utilisant un modèle analytique, nous évaluons l'efficacité du schéma proposé.

## **1.6 Plan de la thèse**

Le reste du document est organisé comme suit. Le chapitre 2 présente les définitions et les concepts de communication sans fil pour véhicule connecté et la mobilité dans les réseaux mobile LTE-A, alors que le chapitre 3 introduit les définitions et concepts de base qui seront utiles à la localisation coopérative avec signatures de signal.

Le chapitre 4 propose deux nouveaux algorithmes de localisation coopérative basée sur une approche ensembliste appliquée à la localisation par approche des signatures, suivis d'une évaluation de performance.

Le chapitre 5 propose un nouvel algorithme pour la sélection dynamique des passerelles dans une architecture intégrée VANET-Réseau mobile, pour le support efficace de la mobilité dans les petites cellules.



Le chapitre 6 propose une architecture intégrée VANET-Réseau mobile LTE-A pour améliorer la mobilité dans les petites cellules LTE-A en utilisant la sélection dynamique des passerelles et le transfert de trafic.

Le chapitre 7, en guise de conclusion générale, résume les contributions majeures, identifie les limitations de nos travaux, et formule des recommandations pour les travaux futurs.

## CHAPITRE 2

### COMMUNICATION SANS FIL POUR VÉHICULE CONNECTÉ

Les communications véhiculaires V2X, nécessitent des technologies de communication sans fil qui répondent de manière fiable aux exigences de qualité de service (QoS) : délai, débit, fiabilité et couverture, en plus des coûts de déploiement. Malgré qu'il existe de nombreuses technologies sans fil qui peuvent supporter certaines applications non-vitales, comme le WiFi (IEEE 802.11a, IEEE 802.11n IEEE802.11ac, etc.), Bluetooth et CALM (2G, 3G), aucune de ces technologies ne peut satisfaire les exigences de QoS en termes de délai et de fiabilité pour les applications de sécurité routière. Néanmoins, il y a deux technologies des plus prometteuses pour les véhicules connectés, à savoir DSRC/WAVE et LTE-Advanced (LTE-A). Ce chapitre présente une vue d'ensemble sur les développements au niveau de ces deux technologies, et permet d'introduire les éléments utiles lors de la présentation de l'architecture intégrée VANET-LTE-A développée au niveau des chapitres 5 et 6. Tout d'abord, nous présenterons le DSRC/WAVE, considéré comme le standard de facto pour les communications entre véhicules. Ensuite, nous présenterons la technologie de quatrième génération (4G) LTE-Advanced; nous nous concentrerons alors sur les défis relatifs aux aspects de mobilité dans les petites cellules « small cell » des réseaux LTE-A.

#### 2.1 DSRC / WAVE pour les véhicules connectés

Dans cette section, nous donnons un aperçu du standard DSRC/WAVE (Dedicated Short Range Communications (DSRC)/Wireless Access for Vehicular Environments (WAVE), qui est spécialement conçu pour les communications V2X.

##### 2.1.1 Vue d'ensemble sur DSRC / WAVE

DSRC est une technologie sans fil pour la communication entre les véhicules (V2V) et entre le véhicule et l'infrastructure (V2I). L'objectif principal de DSRC est de supporter les applications de sécurité routière afin de réduire le nombre d'accidents de circulation routière. Le DSRC prend

également en charge d'autres applications *STI*, comme la gestion de trafic et les applications de confort [53], [58].

Le succès commercial de la technologie WiFi et des normes IEEE 802.11 a conduit à l'élaboration d'une nouvelle norme, à savoir IEEE 802.11p WAVE. L'IEEE 802.11p est basée sur la norme IEEE 802.11a avec des améliorations au niveau des couches physiques et MAC pour des communications à faible latence et une grande fiabilité au niveau des liaisons radio [59].

DSRC / WAVE offre [53] [58] [59]:

- Faible latence: les applications de sécurité routière nécessitent une faible latence et une acquisition rapide de données entre OBU et entre RSU et OBU. Pour ce faire, l'IEEE 802.11p définit les fonctions et les services nécessaires pour échanger les données sans la nécessité d'établir un ensemble de services de base (BSS); il n'y a donc pas de délai d'attente pour les procédures d'association et d'authentification.
- Débits de données variés: IEEE 802.11p a une bande passante de 10 MHz et supporte huit différents débits (3, 4, 5, 6, 9, 12, 18, 24, 27 Mb/s) en utilisant différents schémas de modulation et de codage. Alors que les débits 3, 6 et 12 Mb/s sont obligatoires dans IEEE 802.11p, les autres débits sont facultatifs.
- Haute fiabilité: les applications de sécurité routière nécessitent une liaison de communication fiable même dans des conditions météorologiques extrêmes (neige, pluie, brouillard, etc.) ou avec une grande vitesse des véhicules. L'IEEE 802.11p utilise une bande passante de 10 MHz au lieu de 20 MHz pour IEEE 802.11a.
- Sécurité et confidentialité: la sécurité est essentielle pour la plupart des applications DSRC/WAVE. En fait, les données erronées générées par des attaques malveillantes telles que l'usurpation d'identité, l'altération ou le dysfonctionnement du système peuvent compromettre la sécurité et l'efficacité des applications véhiculaires. En outre, les services de sécurité doivent être conçus pour protéger la vie privée des utilisateurs, et ne pas révéler des informations privées à des tiers non autorisés. La norme IEEE609.2 décrit les services de sécurité pour les messages de gestion DSRC/WAVE et les messages d'applications qui visent à atteindre ces objectifs.

En termes d'allocation du spectre, alors que la FCC (Federal Communications Commission) aux États-Unis et Industrie Canada ont alloué une bande radio de 75 MHz (5.850-5.925GHz), l'ECC (Electronic Communications Committee) en Europe a alloué une bande de 70 MHz (5855-5925 MHz), et le Japon a alloué une bande de 80MHz (5,8 GHz). Cependant, le DSRC au Japon n'est pas compatible avec les normes nord-américaines et européennes en raison de l'évolution historique de l'ETC (Electronic Toll Collection) au Japon [58] [60]. Bien qu'il n'y ait pas une harmonisation mondiale sur le spectre DSRC, les comités de standardisation de l'IEEE et de l'ETSI travaillent ensemble sur l'harmonisation du spectre DSRC entre leurs régions respectives (Amérique du Nord, Europe).

La norme prend en charge quatre techniques de modulation : BPSK, QPSK, 16-QAM et 64-QAM. Alors que la modulation 6 Mb/s (QPSK) semble offrir un bon compromis entre la charge de canal et le rapport signal sur bruit, la plupart des tests de l'IEEE 802.11p aux États-Unis ont utilisé 6 Mb/s. Afin de parvenir à une meilleure performance lors de l'utilisation de la communication DSRC, le système peut adapter son débit de transfert des données basé sur la proximité entre le véhicule et le RSU. Par exemple, si le véhicule est loin du RSU ( $> 150\text{m}$ ), il est recommandé d'envoyer des données en utilisant un faible débit, et il est préférable de passer à un débit plus élevé lorsque le véhicule est à proximité du RSU ( $<25\text{ m}$ ). Pour garantir une efficacité minimale, la norme SAE J2945.1 définit les exigences pour le débit et la puissance de transmission, ainsi que le taux adaptatif des messages transmis [59] [53].

Le DSRC/WAVE est basé principalement sur les normes suivantes: IEEE 802.11p pour les couches physiques et MAC, IEEE 1609 pour la couche MAC et les couches supérieures, et SAE J2735-DSRC Message Dictionnaire Set pour la couche application. L'ETSI ITS\_G5 est l'équivalent européen de DSRC/WAVE ; il est basé sur la norme IEEE 802.11p pour la couche physique et définit différents algorithmes pour la couche MAC [59].

### **2.1.2 Modèle de référence OSI pour DSRC/WAVE**

Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu des protocoles DSRC/WAVE par rapport au modèle de référence OSI (*Open Systems Interconnection*). Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur aux références [58] [59] [53].

Au niveau des couches MAC et physique (PHY), le standard IEEE 802.11p (WAVE) définit les extensions nécessaires à la norme IEEE Std 802.11 pour le fonctionnement dans un environnement véhiculaire, comme le fonctionnement en dehors du contexte de *Basic Service Set (BSS)*, l'utilisation de l'OFDM sur 5,9 GHz, la définition des largeurs de canaux, et la classification de puissance de transmission [59].

La famille des normes IEEE 1609 définit une architecture et un ensemble de protocoles normalisés qui fournissent la base pour un large éventail d'applications DSRC/WAVE. Les protocoles les plus importants de 1609.x IEEE sont [53]:

Le protocole IEEE1609.3, qui emploie le protocole IPv6 et introduit un nouveau protocole appelé *WAVE Short Message Protocol (WSMP)* qui est mis au point pour éviter la surcharge excessive. En plus de *WSMP*, l'IEEE1609.3 définit *WAVE Service Advertisements (WSA)*, et fournit un ensemble de fonctions de gestion des services de soutien WAVE. Ces extensions standard ont été adoptées dans IEEE Std 1609 - 2010.

Le protocole IEEE1609.2 qui fournit des services de sécurité pour les applications et les messages de gestion. Il définit des mécanismes standard pour authentifier et crypter des messages (en particulier les messages *WSM* et des messages *WSA*).

Le protocole IEEE1609.4, qui réalise les opérations multicanaux, et spécifie des extensions au protocole MAC IEEE 802.11. En outre, ce protocole définit sept canaux désignés par 172, 174, 176, 178, 180, 182 et 184. Le canal 178 est un canal de commande (*CCH*) utilisé par défaut pour les communications de sécurité, il permet de diffuser des messages publicitaires et des informations sur les services actuellement disponibles sur les canaux de service. Les autres canaux (172 174, 176, 180, 182 et 184) sont des canaux de service (*SCH*). DSRC ne peut communiquer qu'avec un canal à la fois. Ainsi, afin d'utiliser de multiples canaux, la radio doit dynamiquement basculer entre ces canaux en fonction des besoins. Cette fonction est supportée par le protocole *DSRC-Multi-Channel Coordination (DMCC)*.

Il existe d'autres protocoles IEEE1609.x qui ont déjà été adoptés, comme IEEE Std 1609.11-2010 (*Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for ITS*) et IEEE Std 1609.12-2012 (*Identifier Allocations*). D'autres protocoles IEEE1609.x sont actuellement en développement: comme IEEE P1609.5 (*Communication Manager*) qui est un projet ouvert pour traiter les exigences

de gestion de réseau et IEEE P1609.6 (*Remote Management Services*), qui inclut des fonctionnalités sans fil spécifiques.

Pour les couches supérieures, il existe deux normes SAE (*Society of Automotive Engineers*), à savoir le SAE j2735, et SAE j2945.1 [53].

Le SAE j2735 définit une liste complète de tous les échanges de messages pour la couche application dans DSRC. Il comprend un ensemble de 15 types de messages avec les spécifications de chaque message. Le message de sécurité de base (ou *Basic Safety Message*, *BSM*) envoie ~ 300 octets d'informations d'état sur le véhicule chaque 100ms (10Hz).

Le SAE j2945.1 définit les exigences des messages de sécurité de base *BSM* en termes de performance minimale dans SAE J2735 DSRC ainsi que les trames et éléments de données associés.

### 2.1.3 Déploiement du DSRC/WAVE

Bénéficiant de plusieurs années de développement, la norme DSRC/WAVE offre aujourd'hui une pile entière de protocoles adaptés aux communications véhiculaires. L'efficacité de DSRC/WAVE, en termes de fiabilité et faible latence, a été prouvée par de nombreuses études et bancs d'essai dans le monde réel (V2I, V2V). En ce qui concerne la communication V2V, le passage au stade de déploiement à grande échelle est prévu à l'horizon 2020 [54]. En ce qui a trait à la communication V2I, bien que le déploiement d'une infrastructure (RSU DSRC) soit critique pour plusieurs applications STI, il n'y a toujours pas de plan pour son déploiement à grande échelle, essentiellement en raison de la nécessité d'investissements publics considérables.

Par ailleurs, le succès commercial des réseaux cellulaires mobiles a favorisé l'émergence de nouvelles normes telles que le réseau mobile de 4e génération LTE-A (Long Term Evolution - Advanced) qui bénéficie d'une évolution permanente sous l'égide du consortium 3GPP (3rd Generation Partnership Project) [63].

## 2.2 Réseaux mobiles pour les véhicules connectés

Dans les deux dernières décennies, le nombre d'abonnés mobiles a considérablement augmenté dans le monde entier. Après le succès des technologies 2G/3G (GSM/EDGE, UMTS/HSPA, etc.) et la demande toujours croissante pour l'accès à Internet pour les terminaux mobiles, ITU-R (*International Telecommunications Union-Radio communications*) a spécifié un ensemble d'exigences pour les normes 4G, appelé IMT-Advanced (*International Mobile Telecommunications Advanced*). Cette spécification définit les exigences générales du système comme: la migration vers le tout-IP, des latences plus faibles (latence du transfert des données, latence de handover, etc.), transferts à travers des réseaux hétérogènes, efficacité spectrale élevée, une large gamme de débits de données pour les applications de faible à grande mobilité (100 Mb/s pour les véhicules, 1 Gb/s pour les piétons et les utilisateurs fixes) [61].

Les organismes de standardisation telle que 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), et IEEE étaient en compétition pour élaborer une nouvelle norme qui répond aux exigences IMT-Advanced. La première étape vers cet objectif était le développement de deux technologies, considérées comme deux solutions pré-4G LTE: LTE (release 8/9) développée par le 3GPP et WiMAX développé par IEEE. Ensuite, en se basant sur des améliorations des deux solutions pré-4G, deux nouvelles technologies ont été proposées, le LTE Advanced (LTE-A, release 10) et WiMAX Mobile release 2 (aussi connu sous le nom IEEE 802.16m), qui ont finalement été adoptées comme normes 4G conformes à la spécification IMT-Advanced exigée par l'ITU-R [61] [62].

Néanmoins, grâce à un fort soutien de l'industrie des télécommunications mobiles, la rivalité entre LTE et WiMax s'est soldée par une nette domination de la norme LTE, avec une tendance mondiale vers une large adoption de la 4G LTE. En effet, selon la GSA (*Global mobile Suppliers Association*), à la fin du 1er trimestre 2014, il y avait 240 millions d'abonnés LTE dans le monde, avec 288 réseaux LTE déployés commercialement dans 104 pays. Avec une couverture LTE en pleine expansion dans le monde entier, GSA prévoit que le nombre d'utilisateurs LTE dépassera les 1,5 milliard d'ici 2018 [62].

Alors que la technologie 4G avec LTE-A est à peine installée, l'industrie parle déjà de la 5G. Toutefois, à la date de rédaction de cette thèse, les informations autour de cette technologie restent essentiellement de nature spéculative. En effet, l'ITU vient juste d'établir la feuille de route pour

le développement des spécifications techniques détaillées du réseau mobile 5G, et a défini le terme "IMT -2020" pour les normes 5G à venir [79].

Cependant, la 5G sera basée, vraisemblablement, sur plusieurs des technologies développées ou en cours de développement pour la LTE-A, telles que la densification du réseau à l'aide de petites cellules, relais (fixes et mobiles), la connectivité double (Dual Connectivity, DC), l'agrégation de porteuses (Carrier Aggregation, CA), la communication périphérique à périphérique (D2D), MIMO massive, etc.; des évolutions des évolutions qui ouvrent la voie vers la 5G à l'horizon 2020 avec la promesse d'un débit encore plus élevé (10Gb/s) et d'un plus faible délai (1ms), ce qui renforce ainsi la tendance pour une future intégration véhicule et réseau mobile.

Le reste de cette section se concentrera uniquement sur les normes LTE et LTE-A.

### **2.2.1 Réseau LTE / LTE-A**

La technologie *Long Term Evolution* (LTE) a été lancée la première fois en 2004 comme un projet de 3GPP qui avait pour objectif l'étude de la mise à niveau de la norme 3G *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS). Dans un premier temps, ce projet s'est intéressé au développement du réseau d'accès radio (RAN) de l'UMTS, appelé le réseau d'accès radio terrestre UMTS évolué (E-UTRAN). Puis, 3GPP a défini une architecture simplifiée pour le réseau cœur, appelée *Evolved Packet Core* (EPC). Cette simplification est une conséquence de la transition d'un réseau UMTS qui supporte la commutation de circuits et la commutation de paquets, vers une architecture tout IP. En 2008, la première version de la technologie LTE a été publiée sous l'appellation LTE Release 8 (LTE Rel-8). Avec la release 9, LTE Rel-9 a offert des améliorations substantielles au niveau du débit offert à l'utilisateur final (jusqu'à 300 Mb/s pour la liaison descendante, et jusqu'à 75Mb/s pour la liaison montante), et cela grâce à l'adoption de nouvelles technologies au niveau de la couche physique telle que MIMO et OFDM.

LTE-Advanced (LTE-A) Rel-10/11/12 a étendu les capacités de LTE Rel-8/9 en introduisant de nouvelles fonctionnalités qui permettent des débits plus élevés ainsi qu'une réduction considérable du temps de relèvement et du délai d'établissement de connexion (délai d'environ 50 ms). Par ailleurs, LTE-A permet une efficacité spectrale bien élevée en termes de (b/s/Hz) en utilisant plusieurs antennes (liaison descendante MIMO jusqu'à 8x8 et la liaison montante MIMO jusqu'à 4x4). En plus, le LTE-A permet une plus grande efficacité spectrale par zone de couverture (b/s/Hz/km<sup>2</sup>),



en utilisant le déploiement massif des petites cellules (les femtocellules, picocellules et microcellules) avec la technologie des réseaux auto-organisés (*SON*).

### 2.2.2 Les petites cellules LTE-A

Les petites cellules sont des points d'accès sans fil de faible puissance et de rayon de transmission variable (de 10m à 1km) qui peuvent fonctionner dans le spectre avec ou sans licence. Elles peuvent être utilisées à l'intérieur comme à l'extérieur pour assurer une meilleure capacité et une couverture du réseau cellulaire pour les maisons, les entreprises et les espaces publics. Les opérateurs mobiles utilisent les petites cellules comme des éléments clés pour fournir une plus grande efficacité spectrale par zone de couverture et pour décharger le trafic aux heures de pointe.

Dans la terminologie 3GPP, une femtocellule LTE est appelée «Home eNode B (HeNB)». Dans ce qui suit, nous considérons les femtocellules dans le contexte LTE-A; les termes femtocellule LTE et HeNB sont interchangeables.

Selon les récentes améliorations de 3GPP LTE-A [65], les réseaux femtocellules peuvent être déployés comme illustré dans la figure 2. Le HeNB comprend les fonctions de l'eNB avec un petit champ de transmission. Chaque HeNB est relié au réseau cœur EPC à travers une passerelle de sécurité et une passerelle HeNB (facultative). Dans la pratique, les échanges du HeNB entre l'entité de gestion de mobilité (*MME*) et la passerelle de service (*serving gateway*, ou *S-GW*) sont effectués respectivement à travers les liens S1 (interfaces S1-MME et S1-U).

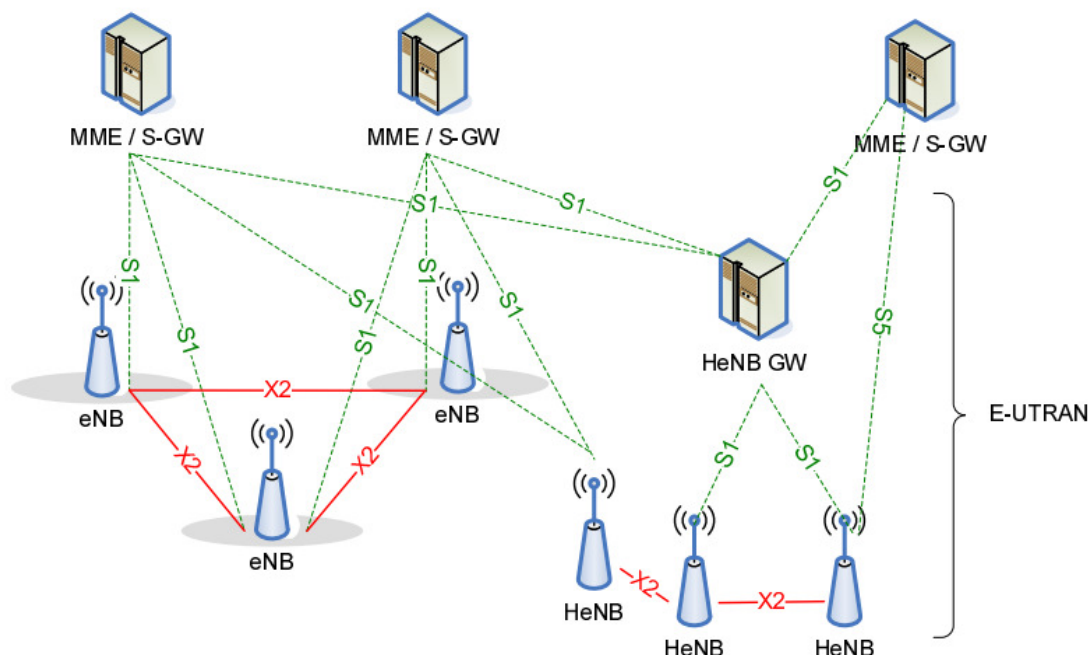


Figure 2.1 Architecture simplifiée du réseau LTE-A avec petites cellules HeNB [65]

## 2.3 Gestion de la mobilité

Afin de garder un utilisateur mobile toujours mieux connecté, un réseau cellulaire mobile doit mettre en œuvre des procédures spécifiques pour gérer d'une manière transparente la mobilité de ses clients.

Dans les réseaux mobiles, le terme mobilité désigne généralement la mobilité du terminal. La mobilité du terminal peut être décrite comme le mouvement d'un terminal, entraînant une relève ("handover, handoff", HO). La gestion de mobilité comprend la gestion de la relève et la gestion de la localisation. La gestion de la relève désigne l'ensemble des opérations mises en œuvre pour permettre au terminal mobile de libérer les ressources au niveau de la cellule d'attache (appelé point d'attache ou point d'accès) et d'établir une liaison à la nouvelle cellule, tout en préservant les sessions en cours. La relève entraîne un transfert de la connexion de l'utilisateur d'un canal radio à un autre et peut avoir lieu dans la même cellule ou dans des cellules différentes. Quant à la gestion de la localisation, elle se charge de la mise à jour des emplacements des utilisateurs mobiles afin de faciliter la délivrance de services [9].

La relève peut être de type hard ou soft. Dans la relève de type hard, la connexion avec la cellule source est rompue avant l'établissement de la connexion avec la cellule cible, c'est pour cela que ce type de relève est également appelé break-before-make. La relève de type hard entraîne une brève interruption de la communication, cependant elle permet d'optimiser l'utilisation des canaux. En effet, à chaque instant le mobile est connecté à un seul canal. La relève hard est utilisée notamment dans les réseaux mobiles LTE. Dans la relève de type soft (ou soft handover), parallèlement à l'établissement de la connexion avec la cellule cible, la connexion avec la cellule source est maintenue pour une durée déterminée, d'où l'appellation make-before-break.

La signalisation, dans un réseau de télécommunications, désigne l'échange d'informations qui concerne l'établissement, le contrôle et la gestion des connexions (source : ITU-T I.112). Au niveau de la relève dans un réseau mobile, la signalisation désigne spécifiquement l'échange de messages défini au niveau des procédures de relève.

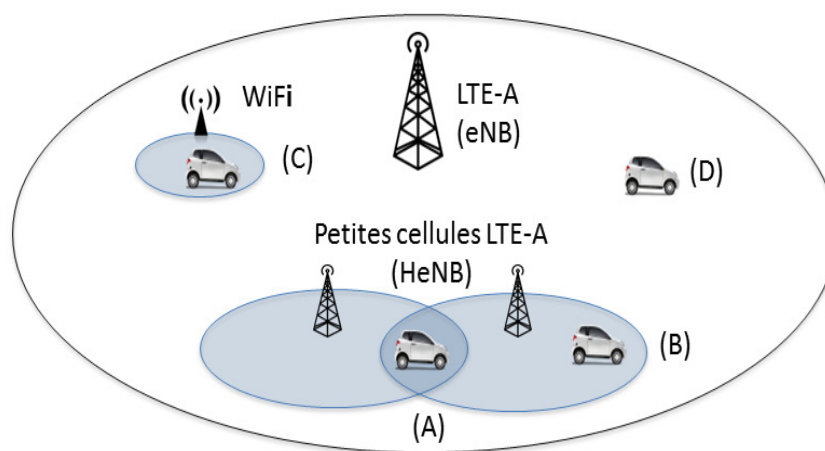


Figure 2.2 Relèves dans un réseau hétérogène (HetNet) LTE-A

- (A) Relève horizontale entre petites cellules LTE-A
- (B) Relève horizontale entre petite cellule et macrocellule LTE-A
- (C) Relève verticale entre cellule WiFi et macrocellule LTE-A
- (D) Relève intra-eNB.

Un réseau mobile hétérogène (Hetnet) est généralement composé de plusieurs couches (macrocellules, petites cellules), et dans certains cas de technologies d'accès différentes (par exemple, LTE-A, Wifi), voir la figure 1.1 [28]. Notons que dans la terminologie 3GPP, la

macrocellule et petite cellule sont désignées respectivement par eNB (evolved Node B) et HeNB (Home evolved Node B).

Dans un réseau HetNet, on distingue principalement deux types de relèves : la relève horizontale et la relève verticale. On parle de relève horizontale lorsque l'ancien et le nouveau point d'accès utilisent la même technologie d'accès (ex. LTE-A à LTE-A). Par contre, dans la relève verticale, il s'agit de technologies d'accès différentes (ex. LTE-A à WiFi). Dans le cas de la relève intra-eNB, de nouvelles ressources radio ("resource blocks", RBs) sont allouées au mobile lorsqu'il se déplace dans un secteur (ou cellule) servi par la même eNB.

Dans cette thèse, et plus particulièrement dans le volet communication sans fil pour véhicules connectés on s'intéresse spécifiquement à la relève entre petites cellules. Les termes petite cellule (Small Cell, SC) et HeNB seront utilisés de façon interchangeable.

### **2.3.1 Relève et rapport de mesure**

Quand le mobile se déplace d'une cellule à l'autre, il doit mesurer la puissance et la qualité du signal des cellules voisines. On parle alors de relève (HO) lorsque l'UE est en mode connecté, et de sélection ou resélection de cellule lorsque l'UE est en mode veille (idle). Dans le réseau LTE, la décision de relève est basée sur le réseau (l'eNB), suite au message de commande de l'eNB et la transmission du rapport des mesures par l'UE. L'UE mesure les paramètres RSRP (Reference Signal Received Power), RSRQ (Reference Signal Received Quality) et RSSI (Receive Strength Signal Indicator).

RSRP mesure la puissance moyenne reçue sur les éléments de ressources qui transportent les signaux de référence spécifiques des cellules dans certaines bandes de fréquence. RSRP est applicable dans les deux modes RRC\_idle et RRC\_connected, tandis que RSRQ est applicable uniquement en mode RRC\_connected (seulement pour la sélection/resélection). La mesure de RSRQ fournit des informations supplémentaires lorsque RSRP ne suffit pas pour prendre une décision de relève ou de resélection de cellule. Dans la procédure de relève, la spécification LTE permet d'utiliser RSRP, RSRQ, ou les deux.

Les mesures qui se rapportent aux paramètres de transmission sont connues sous le nom d'indicateur de qualité de canal CQI (Channel Quality Indicator). Selon cette valeur (indice CQI), l'eNB prend la décision d'attribuer un MCS particulier (modulation et codage) pour un mobile

particulier. Plus le CQI est grand (allant de 0 à 15) plus le schéma de modulation et de codage est grand et le débit est important.

### 2.3.2 Procédure de relèvement

La procédure de relèvement peut être divisée en trois phases [65]: une phase de préparation, une phase d'exécution et une phase d'achèvement.

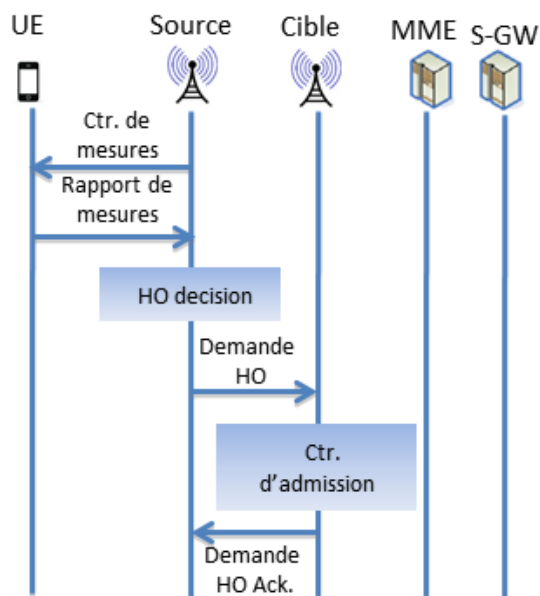


Figure 0.3 Procédure de relèvement - phase de préparation

Au niveau de la phase de préparation, comme illustrée au niveau de la figure 2.3 :

- L'eNB source envoie un message de *contrôle de mesures* (*measurements contrôle*) pour configurer les mesures requises au niveau du mobile UE.
- Le mobile UE déclenche l'envoi du message *Rapport de mesure* (*measurement report*) au eNB source. Ce déclenchement peut se faire d'une façon périodique ou basée sur un évènement.
- L'eNB prend la décision de relèvement en se basant sur le rapport des mesures, l'état de la charge (disponibilité des ressources) et les informations de service.
- L'eNB source envoie un message de *demande d'admission* à l'eNB cible (target).
- L'eNB cible effectue le contrôle d'admission en se basant sur le niveau des ressources disponibles. Notons ici que plusieurs niveaux de priorités peuvent être définis

dépendamment de la nature de l'admission demandée (nouvel appel/relève), niveau de service (temps réel/best effort), etc.

- L'eNB cible envoie un message d'acquiescement (ack) à l'eNB source.

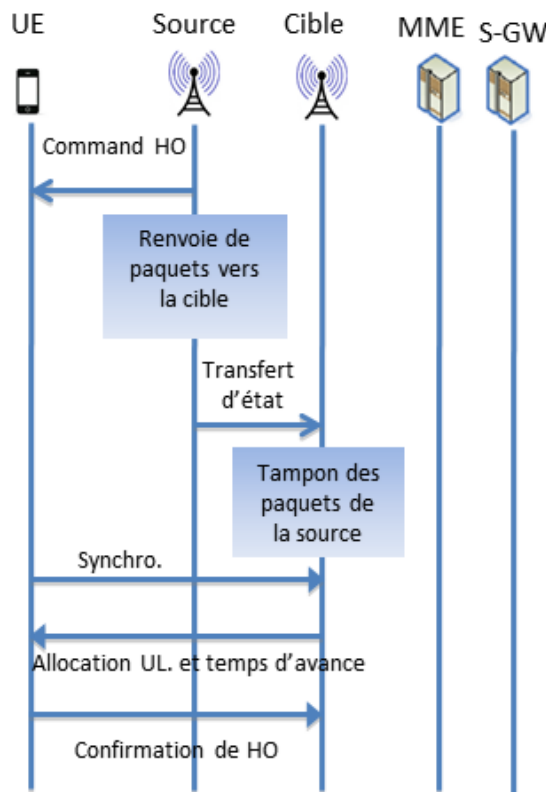


Figure 2.4 Procédure de relève - phase d'exécution

Au niveau de la phase d'exécution de la relève, comme illustrée au niveau de la figure 2.4 :

- L'eNB source envoie un message HO command au mobile UE, et l'eNB source commence le renvoi de paquets vers l'eNB cible.
- L'eNB source envoie un message d'information d'état à l'eNB cible.
- Le mobile UE effectue une synchronisation à l'eNB cible et y accède en utilisant la procédure d'accès aléatoire au canal RACH (Random Access Channel).
- L'eNB cible effectue l'allocation des ressources sur la voie montante et la mise à jour de l'avance en temps. Cette dernière permet la synchronisation de la réception des signaux sur la voie montante et le maintien l'orthogonalité entre les UEs sur cette voie.
- L'UE envoie un message de confirmation de relève *HO confirm* à l'eNB cible qui peut commencer l'envoi des données à l'UE.

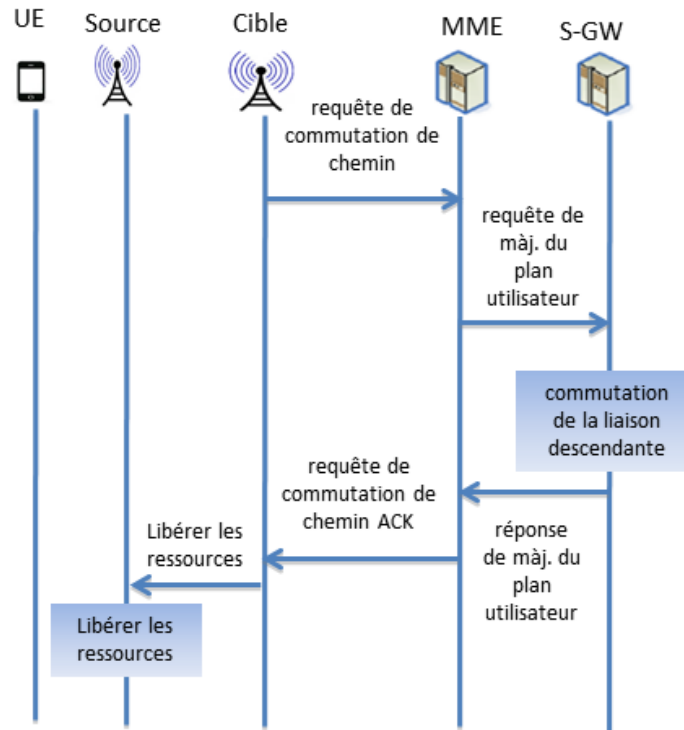


Figure 2.5 Procédure de relè - phase d'achèvement

Au niveau de la phase d'achèvement de relè, comme illustré au niveau de la figure 2.5 :

- L'eNB cible envoie une requête de commutation de chemin (*Path Switch Request*) vers le MME au niveau du réseau cœur EPC.
- Le MME envoie une requête de mise à jour du plan utilisateur (user plane) au S-GW.
- La commutation de la liaison descendante au niveau du S-GW.
- Un message de réponse à la requête de mise à jour du plan utilisateur est envoyé au MME.
- Un message d'acquiescement (ACK) envoyé à l'eNB cible pour confirmer la commutation du chemin.
- Un message est envoyé à l'eNB source pour demander la libération des ressources radio et plan de contrôle (contrôle plane) au niveau de l'eNB source.

### 2.3.3 Mobilité et réseau auto-organisé

Plusieurs opérations incluant la planification, l'optimisation et la maintenance sont essentielles pour garantir un fonctionnement efficace et fiable du réseau mobile; toutefois, ces opérations sont habituellement effectuées d'une façon manuelle et nécessitent souvent une expertise spécialisée, ce qui engendre des coûts d'exploitation significatifs et des délais d'interventions plus longs. Afin de résoudre ces problèmes, la technologie SON (Self optimizing/organizing Network) a été adoptée par le groupe 3GPP depuis la première version de la technologie (LTE-Rel-8), puis son développement s'est poursuivi au niveau des versions subséquentes de LTE-Advanced.

Le réseau auto-organisé SON est un concept clé dans l'architecture 3GPP LTE. Il peut être divisé en trois fonctions: l'autoconfiguration, l'auto-optimisation (Self-Optimisation) et l'autoréparation (Self-Healing). L'autoconfiguration permet la fonction 'plug-and-play' pour les stations (eNBs/HeNBs) nouvellement déployées pour assurer une planification simplifiée et un déploiement rapide. Elle assure ainsi la configuration automatique de l'identité de la cellule physique (PCI), la fréquence et la puissance de transmission.

L'auto-optimisation permet d'optimiser la relève, la couverture, la capacité et la gestion des interférences. L'équilibrage de charge de la mobilité (Mobility Load Balancing, MLB) est une fonction d'auto-optimisation où les cellules éprouvant une congestion peuvent transférer la charge aux cellules qui ont plus de ressources disponibles. MLB permet d'échanger l'information sur le niveau de la charge et la capacité disponible. Ces informations sont rapportées périodiquement au réseau, avec des périodes de l'ordre de 1 s à 10 s.

Finalement, l'autoréparation permet la détection automatique, la réparation des erreurs et l'ajustement automatique des paramètres.

Par ailleurs, on peut distinguer trois types d'architecture SON : l'architecture centralisée, distribuée ou hybride.

Dans l'architecture centralisée, les algorithmes SON résident dans l'EMS (Element Management System) ou dans un serveur SON séparé qui gère les eNBs. Périodiquement ou selon le besoin, les rapports de mesures (ex. KPIs) sont transmis à l'algorithme SON au niveau du serveur centralisé. Ensuite, l'algorithme SON génère les paramètres de configuration à appliquer pour les eNBs. L'avantage de cette approche est que l'algorithme SON a une vision globale de la zone de



couverture. Il peut ainsi appliquer des algorithmes plus optimaux. Par contre, son inconvénient est qu'elle nécessite la transmission des mesures et des rapports KPI à un point central dans le réseau, ce qui risque de générer, dépendamment du débit des liens, plus de délais comparativement à une implémentation au niveau des eNBs. Afin de minimiser le problème de mise à l'échelle de cette solution, les données sont filtrées au niveau des eNBs avant d'être envoyées au serveur central. Néanmoins, vu le délai nécessaire pour la collecte des mesures, l'applicabilité de cette approche est restreinte aux applications qui tolèrent un temps de réponse plus lent.

Dans une architecture distribuée, les algorithmes SON résident dans les eNBs et sont basés sur des mesures reçues à partir des autres eNBs voisins via les liens X2. Cela permet des décisions autonomes et plus rapides. De plus, l'architecture distribuée permet un déploiement plus facile dans des réseaux multi-vendeurs/multi-opérateurs.

Dans une architecture hybride, afin de profiter des avantages des deux approches précédentes, une partie de l'algorithme SON est exécutée au niveau du serveur centralisé ou au niveau de l'NMS, et une autre partie est exécutée au niveau des eNBs. Ainsi, les décisions par rapport au long terme peuvent être basées sur une approche centralisée. Par contre, les mise-à-jour et les améliorations peuvent être basées sur une approche distribuée.

L'optimisation de la robustesse de la mobilité (Mobility Robustness Optimization, MRO) est une fonction SON d'auto-optimisation qui permet la détection et la correction automatiques des erreurs dans la configuration de la relève, telle que celles causant une défaillance de liaison radio (RLF) en raison d'une relève tardive ou hâtive, ou une relève vers une cellule incorrecte.

Une relève due à l'équilibrage de charge est effectuée comme une relève régulière ; cependant il se peut que la modification des paramètres de relève soit nécessaire de sorte que l'équipement utilisateur (UE) ne retourne pas vers la cellule surchargée (ping-pong). Cette modification doit être faite en coordination entre les deux cellules, de sorte que les paramètres de relève restent cohérents dans les deux cellules. Les eNBs doivent estimer le niveau de déplacement de la frontière de la cellule, pour éviter un retour rapide de l'UE.

## **CHAPITRE 3**

### **LOCALISATION**

Durant les deux dernières décennies, le développement des techniques et systèmes de localisation a connu un grand intérêt aux niveaux académique et industriel. La capacité du nœud à se localiser est devenue une caractéristique essentielle pour un grand nombre d'applications et de services.

Grâce à la localisation, l'interaction entre le nœud et son environnement a une plus grande valeur. Au niveau de l'application de la localisation dans les systèmes de transport intelligent, l'exemple le plus parlant est certainement celui des véhicules autonomes (ex. Google Car), qui permettent une conduite autonome ou semi-autonome grâce à plusieurs capteurs embarqués (ex. caméras, radars, Lidars, GNSS, etc.). Dans le domaine des réseaux mobiles, la localisation permet une meilleure gestion des ressources du réseau (ex. gestion de mobilité, sélection de passerelles, routage basé sur la localisation, etc.).

Il existe aujourd'hui diverses technologies pour la radiolocalisation (intérieure, extérieure), nous citons par exemple : les technologies globales GNSS « Global Navigation Satellite Systems », les technologies de radiolocalisation basées sur les systèmes sans fils (cellulaire, WLAN « Wireless Local Area Network ») utilisant des techniques telles que la puissance de signal RSS « Radio Signal Strength », le temps d'arrivée TOA « Time Of Arrival », la différence de temps d'arrivée TDOA « Time Difference Of Arrival », l'angle d'arrivée AOA « Angle Of Arrival », l'approche des signatures « Fingerprinting », ou la localisation coopérative.

Dans ce chapitre, nous introduisons les définitions et concepts de base qui seront utiles lors de la présentation des travaux du chapitre 4 sur la localisation coopérative avec signatures de signal.

### **3.1 Revue des principales techniques de localisation**

#### **3.1.1 Étapes pour l'estimation de la position**

L'estimation de la position peut s'effectuer directement à partir des signaux radio échangés entre les nœuds émetteur et récepteur, appelé positionnement direct, ou par des approches à deux étapes. Ces dernières consistent en premier lieu à l'estimation des paramètres de localisation (ex. TOA,

TDOA, AOA, RSS) à partir des signaux reçus, puis l'estimation de la position à partir de ces paramètres en utilisant des techniques comme la triangulation, la trilatération ou la multilatération, voir la figure 3-4. Bien que les approches à deux étapes soient en général sous-optimales, leur complexité est inférieure aux approches directes avec des performances généralement très proches pour des SNR et bande passante suffisamment élevée. C'est pourquoi la plupart des systèmes pratiques adoptent l'approche à deux étapes.

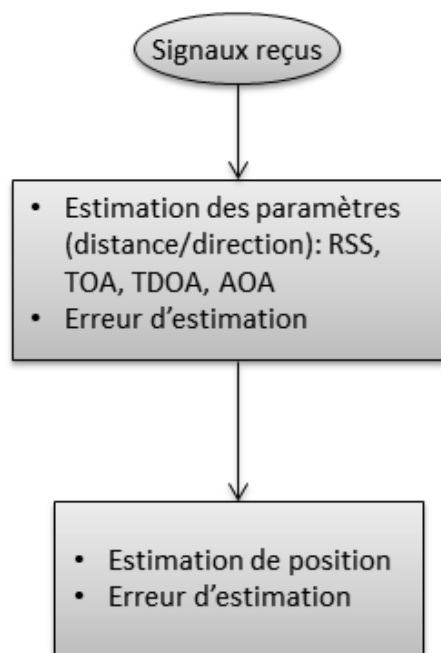


Figure 3.1 Méthode à deux étapes pour l'estimation de la position

### 3.1.2 Localisation globale par GNSS

Le système de navigation globale par satellite (GNSS) utilise les signaux reçus à partir de satellites (24 satellites pour le système GPS « Global Positioning System »). Au minimum, quatre satellites sont nécessaires pour une localisation 3D. Un nombre plus élevé est nécessaire pour une localisation plus précise.

La localisation basée sur GNSS subit une dégradation des performances dans les zones où l'accès est difficile aux satellites (dans les canyons urbains, tunnels, etc.). En plus, le système GNSS a une faible fréquence de mise à jour de la position. Elle est d'environ 10Hz (ou moins pour les systèmes moins onéreux). Pour améliorer la fréquence de mise à jour de la position, il existe des techniques hybrides utilisant la fusion des données entre plusieurs capteurs. L'exemple le plus

fréquent est celui de la fusion GPS avec capteur inertiel. Toutefois, cette solution reste insuffisante pour un grand nombre d'applications, particulièrement dans les zones avec accès difficile aux satellites tels que les environnements intérieurs, canyons urbains, ponts, tunnels, etc.

Le système DGPS « Differential Global Positioning System » permet d'obtenir des précisions métriques ou inférieures. Il est basé sur le principe suivant : une balise fixe dont la position absolue est connue avec précision reçoit les signaux GPS, puis calcule elle-même sa position par GPS et peut ainsi déduire les valeurs d'une partie des erreurs. La correction à appliquer est alors transmise par radio et en temps réel aux GPS dans leur voisinage pour qu'ils corrigent à leur tour leurs positions. On peut ainsi passer d'une précision de l'ordre de 10 à 20 mètres à une précision de 3 à 5 mètres sur une grande zone (plusieurs kilomètres). Pour les systèmes plus sophistiqués et plus onéreux, comme le DGPS avec utilisation du code de phase on peut atteindre une précision centimétrique (20 à 30 cm). Les géomètres utilisent ce type de système avec une balise fixe émettrice sur le terrain.

Le DGPS offre également le contrôle d'intégrité. Lorsque le niveau de précision de la station de référence chute sous certaines limites établies, un signal d'avertissement est transmis automatiquement au navigateur pour l'avertir que le service n'est plus fiable [52].

En plus du coût, l'autre inconvénient majeur du DGPS est la dégradation des performances dans les zones avec un accès difficile aux satellites (l'effet de canyons urbains, Tunnels) [52].

RTK-GPS (GPS en temps réel cinématique) peut être considéré comme une variante plus élaborée du DGPS [52]. C'est l'une des technologies de positionnement les plus précises, elle permet d'obtenir une précision centimétrique de la position en temps réel. Elle se base sur une station référence qui transmet les corrections, ici en temps réel, et utilise les mesures de porteuse-phase « carrier-phase » pour calculer les pseudo-distances (distances satellites-mobile) ce qui permet d'atteindre une précision plus grande. L'utilisation du RTK-GPS est classiquement limitée aux applications de type géodésique à cause du coût matériel [52].

Le GPS-Assisté ou AGPS « Assisted GPS », est utilisé de nos jours dans la plupart des mobiles équipés de GPS. Il utilise le réseau de communication (ex. réseau cellulaire) pour assister le GPS ordinaire. Ceci permet au récepteur d'avoir une première estimation de la position en un temps très court, grâce à la transmission plus rapide par réseau des éphémérides des satellites. Ce temps, appelé TTF « Time To Fix », est de l'ordre de 10 à 20 secondes pour AGPS, contre 1 à 2 minutes pour GPS ordinaire.

Afin d'améliorer la précision de localisation dans le mode navigation, on peut combiner le GPS avec un système inertiel. Cette fusion est souvent accomplie par l'utilisation de techniques de fusion de données basées sur le filtre de Kalman ou ses dérivés (ex. filtre de Kalman Étendu). Les systèmes hybrides utilisent généralement un GPS avec un système INS à faible coût qui permet de maintenir une précision de positionnement de 3 mètres jusqu'à 10 secondes et de 6 mètres jusqu'à 20 secondes après la disparition du signal GPS [52] [93].

### 3.1.3 Méthode de puissance du signal (RSS)

La méthode RSS « Received Signal Strength » est définie comme étant la puissance du signal mesurée au niveau du circuit de réception. Les mesures de la puissance du signal de plusieurs stations de base BSs permettent d'estimer les distances entre le mobile et les BSs.

Si les niveaux de signal de trois nœuds émetteurs différents sont connus, la position du mobile peut être déterminée comme point unique d'intersection des trois cercles. Mais en pratique, la propagation du signal n'est pas uniforme en raison de l'affaiblissement du signal dû aux trajets multiples et aux zones d'ombres, ce qui pose un problème pour l'évaluation de la distance. Les variations causées par les zones d'ombres dues aux obstacles (murs, immeubles, arbres, etc.) ne peuvent pas être compensées, ces variations sont traitées comme des erreurs aléatoires dans les estimations de la distance. La borne de Cramér-Rao nous donne la limite inférieure sur la distance estimée  $\hat{d}$  [66] :

$$\sqrt{\text{Var}(\hat{d})} \geq \frac{\ln 10}{10} \frac{\sigma_{sh}}{n_p} \cdot d \quad (3.1)$$

Avec :  $d$  la distance entre les deux nœuds (mobile-BS),  $n_p$  le facteur d'atténuation,  $\sigma_{sh}$  l'écart type de la variable aléatoire représentant l'effet de zones d'ombres.

D'après la formule précédente, on remarque que l'exactitude de la distance estimée dépend des paramètres du canal de propagation  $\sigma_{sh}$  et  $n_p$  en plus de la distance  $d$  entre les deux nœuds.

À l'inverse de la technique de puissance de signal, les méthodes temporelles de localisation TOA « Time Of Arrival » et TDOA « Time Difference Of Arrival » permettent une plus grande précision, en particulier pour les signaux large bande. En effet le signal large bande permet une résolution temporelle de 1ns ou moins, ce qui correspond à une résolution spatiale de 30cm [76], [57].

### 3.1.4 Localisation par temps d'arrivée (TOA)

Les mesures du temps d'arrivée du signal peuvent s'effectuer au niveau de la BS ou au niveau du mobile. Si la BS et le mobile sont entièrement synchronisés, les mesures d'arrivée TOA sont directement liées aux distances BS-Mobile. Dans ce cas, au minimum, trois mesures sont nécessaires pour localiser le mobile sur deux dimensions.

TOA utilise la triangulation pour calculer la position du mobile. En calculant le temps  $t$  requis pour transmettre le signal du mobile vers les trois stations de bases BSs les plus proches. Soient  $i = 1, 2, 3$  les indices des BSs,  $(x, y)$  la position du mobile,  $(x_i, y_i)$  la position de la BS <sub>$i$</sub>  et  $d_i$  la distance entre la BS  $i$  et le mobile. Le temps  $t_i$  est converti en distance  $d_i$  de la manière suivante:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} = c(t_i - t_0) \quad (3.2)$$

Avec  $c$  la vitesse de propagation du signal.

### 3.1.5 Localisation par différence de temps d'arrivée (TDOA)

Le calcul par différence de temps d'arrivée TDOA peut être effectué par deux méthodes, la première se base sur les mesures TOA :

Soit :  $i = 1, 2 \dots M$  les indices des BSs,  $(x, y)$  la position du mobile,  $(x_i, y_i)$  la position de la BS <sub>$i$</sub>  et  $d_i$  la distance entre BS <sub>$i$</sub>  et le mobile, on a alors :

$$d_{i,0} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} = c(t_i - t_0) \quad (3.3)$$

$t_0$  est le décalage de l'horloge du mobile par rapport aux BSs.

Soient  $t_{i,1}$  la différence de temps TDOA estimée entre BS<sub>1</sub> et BS <sub>$i$</sub>  et  $c$  la vitesse de propagation du signal. La différence de distance entre les BSs et la station de contrôle BS<sub>1</sub> est donnée par:

$$\begin{aligned}
d_{i,0} - d_{1,0} &= \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\
&= c(t_i - t_1) = c t_{i,1}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

On remarque que le terme  $t_0$  (décalage de l'horloge du mobile par rapport aux BSs) est éliminé du calcul. Donc la synchronisation du mobile n'intervient plus dans le calcul. C'est un grand avantage du TDOA par rapport au TOA. À noter que le calcul du terme  $c(t_i - t_1)$  peut être fait de deux façons: la première est basée sur la mesure de différence de temps d'arrivée TOA dans deux positions différentes. Elle n'est pas très utilisée du fait qu'elle nécessite des mesures absolues du TOA, donc une synchronisation entre les BSs et le mobile.

La deuxième méthode emploie des techniques de corrélation. Une corrélation croisée est appliquée au signal reçu au niveau de 2 BSs, puis on calcule le temps correspondant à la crête du signal résultant.

### 3.1.6 Mesure par angle d'arrivée (AOA)

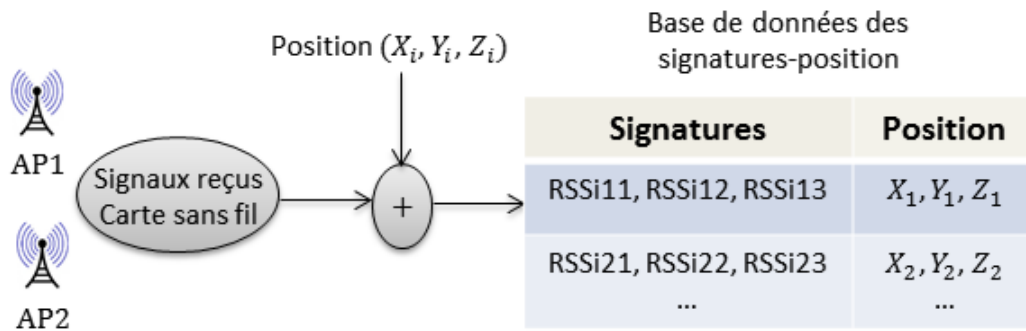
Afin de trouver la position du mobile, la méthode AOA utilise une rangée d'antennes qui déterminent l'angle d'arrivée du signal. En supposant une géométrie bidimensionnelle, la mesure de l'angle d'arrivée sur 2 BSs est suffisante pour localiser un mobile.

La méthode AOA exige une rangée d'antennes « antenna array » sur chaque BS (ou mobile).

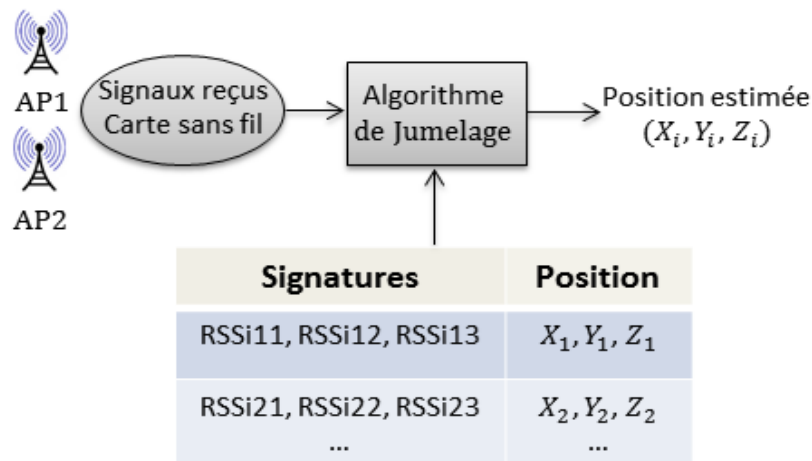
Un des inconvénients de cette technique est que la mesure d'angle est sensible à l'augmentation de la distance. De ce fait, la méthode AOA est préférable pour les distances courtes. Cette technique peut être utilisée d'une façon hybride avec des techniques de distance comme (ToA, TDOA, RSS). La méthode hybride de localisation pour mobile se base généralement sur l'estimation conjointe de l'angle d'arrivée AoA (ou même l'angle de départ AoD) en plus d'une méthode basée sur l'estimation de la distance telle que ToA, ou la différence du temps d'arrivée TDoA entre mutitrajets. Cette technique a l'avantage d'utiliser une seule station référence pour le calcul de la position du mobile [77].

### 3.1.7 Approche des signatures

La localisation par approche des signatures, connue également dans la littérature sous le nom de "fingerprinting", est une technique qui exploite la corrélation entre les signaux RF reçus et l'emplacement de réception. L'avantage principal de cette technique est qu'elle n'exige pas une infrastructure dédiée pour la localisation. En effet, cette technique exploite les signaux des réseaux sans fil déjà déployés (WLAN, cellulaire, etc.) ; par conséquent, elle ne nécessite pas de modifications au niveau matériel, que ce soit au niveau du réseau ou de l'unité mobile. Divers caractéristiques du signal RF peuvent être considérées pour construire les signatures. La méthode de puissance de signal (RSSI) est de loin la plus souvent utilisée, mais il y a également la méthode temporelle basée sur temps d'arrivée ou encore la méthode de réponse impulsionnelle du canal.



(a) phase de collecte de données



(b) phase de localisation

Figure 3.2 Schéma de localisation par approche des signatures standard.



La localisation par approche des signatures se déroule en deux phases : une phase de collecte de données (hors ligne) et une phase de localisation (en ligne). Tout d'abord, la phase hors ligne permet de construire une base de données des couples signatures-position. Puis, dans la phase de localisation, un algorithme de jumelage est utilisé pour estimer la position qui correspond aux signaux mesurés. Plusieurs algorithmes ont été proposés dans la littérature, pour la localisation basée sur l'approche par signatures [44] [80-86], dont plusieurs ont débouché sur des applications commerciales. Notons que dans cette approche 'standard', la position du nœud est estimée comme étant un point et non pas comme une zone de présence (polygone) ; cette dernière approche sera expliquée dans le chapitre suivant.

Par ailleurs, la localisation par signatures présente également certaines limites. En effet, en plus du problème de précision de localisation, la mise à jour de la base de données des signatures est généralement faite hors ligne et elle n'est pas automatique, elle nécessite généralement l'intervention d'un opérateur dans le processus de collecte de données signature – position, et du calibrage et recalibrage de la base de données quand il y a un changement majeur dans l'environnement de propagation, ce qui rend le processus long et coûteux.

Parmi les autres limites de l'approche des signatures, il y a la variation de canal qui peut provoquer une dégradation des performances. En effet, ces variations de canal qui sont dues, par exemple, au changement dans l'environnement de propagation, peuvent invalider les signatures dans la base de données. Pour faire face à ce problème, généralement d'autres mesures sont effectuées pour générer une nouvelle base de données. Cette approche nécessite l'étude des variations de canal dans le temps et dans l'espace pour déterminer, par exemple, l'heure de la journée et l'endroit concerné par cette variation. Une deuxième approche, utilise la prédiction du changement des signatures en se basant sur l'historique des changements de puissance du signal. Cependant, même si l'estimation par l'approche prédictive est moins coûteuse en ressources et en temps de mise à jour, elle reste relativement moins efficace que celle de l'approche basée sur les mesures [45]. Vu le risque de changement dans l'environnement de propagation, la question qui se pose alors est de savoir comment détecter ce changement. Dans le cas mobile, l'une des solutions possibles serait d'utiliser la mobilité du nœud à l'aide des capteurs proprioceptifs (ex. INS) pour détecter s'il y a un changement dans la position ou un changement dans l'environnement de propagation. L'autre solution possible, pour le cas mobile ou statique, est l'utilisation de la localisation coopérative.

### 3.1.8 Localisation coopérative

La localisation coopérative peut avoir lieu entre deux ou plusieurs nœuds, elle s'appuie sur les contraintes données par la position relative (distance, angle) qui sont calculées en utilisant des techniques telles que le temps d'arrivée (ToA), la puissance de signal (RSSI), ou l'angle d'arrivée (AoA).

Les algorithmes de localisation coopérative peuvent être distribués ou centralisés et peuvent se baser sur des approches probabilistes ou ensemblistes. Ces notions seront abordées dans la section suivante.

Les principales caractéristiques de la localisation coopérative par rapport aux techniques non coopératives sont :

- la communication nœud à nœud, et balise à nœud. Ceci permet une meilleure couverture et permet de réduire le nombre de nœuds balise (références « anchors ») nécessaire pour localiser les nœuds.
- La localisation coopérative permet une amélioration de la précision en exploitant les contraintes données par les positions relatives entre nœuds (ex. distance internœuds, angle d'arrivée, présence, etc.).

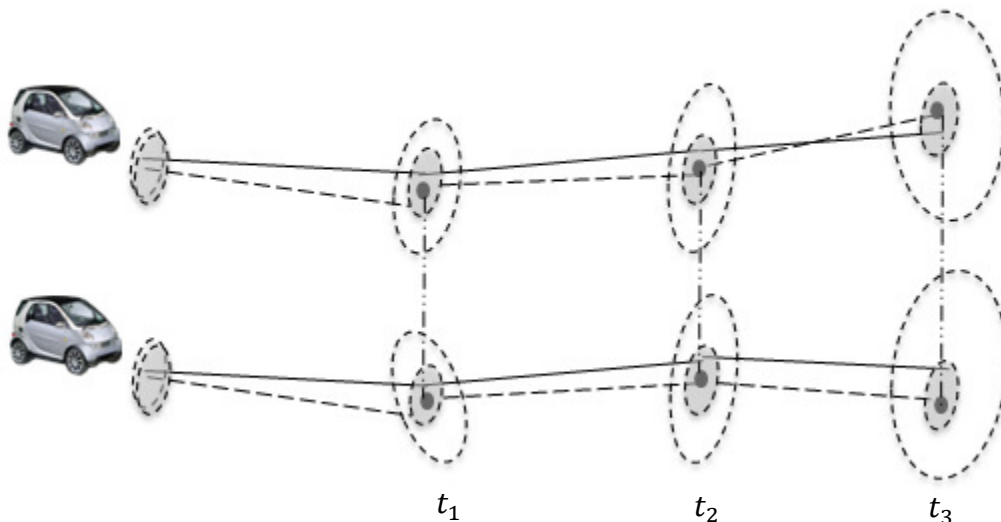


Figure 3.3 Localisation coopérative entre mobiles [93]

Aux instants  $t_1, t_2, t_3$ , chaque mobile mesure la position relative de son voisin et utilise cette information pour la mise à jour de sa propre position. L'incertitude sur la position estimée est ainsi réduite [93].

Au niveau de la mise en œuvre, plusieurs technologies peuvent être utilisées, en particulier la technologie UWB ou CSS (Chirp Spread Spectrum) qui sont deux normes de la couche physique du nouveau standard IEEE 802.15.4a, qui permettent la mesure de distance entre deux nœuds.

## **3.2 Techniques d'estimation de la position**

Il existe plusieurs techniques et outils mathématiques pour résoudre le problème d'estimation de la position. Le choix de l'outil à utiliser dépend de plusieurs facteurs, nous citons par exemple : les données disponibles, les conditions initiales, les contraintes au niveau implémentation (c.-à-d. compromis entre la complexité au niveau calcul et la précision requise), etc.

Parmi les classifications possibles, les algorithmes de localisation peuvent être classifiés en algorithmes de localisation centralisés et algorithmes de localisation distribués [55].

### **3.2.1 Algorithmes de localisation distribués**

On entend par algorithmes de localisation distribués, les algorithmes qui utilisent l'information (distance, angle, etc.) d'une façon locale pour calculer la position du nœud à l'opposé des méthodes centralisées qui utilisent l'information globale du réseau.

La méthode la plus simple pour calculer la position est la méthode directe. Elle consiste à résoudre un système d'équations trigonométriques. L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle peut produire une solution double ou des solutions impossibles. Des heuristiques sont utilisées pour enlever certaines ambiguïtés comme de prendre la moyenne dans le cas où on a deux solutions proches vérifiant les contraintes. Le détail du calcul pour cette méthode est donné dans [76].

Parmi les méthodes les plus répandues, il y a la méthode des moindres carrés (LS). C'est une technique classique d'estimation utilisée dans plusieurs domaines, en particulier en géodésie pour le calcul des positions géodésiques. Elle peut être implémentée d'une façon itérative ou non itérative [76].

Une autre version de cette technique est la technique des moindres carrées pondérées (WLS). L'avantage de la méthode WLS est qu'elle permet de donner des poids faibles aux mesures qui ont plus d'erreurs [76] [57].

Parmi les limites de la méthode LS, c'est qu'elle nécessite que les erreurs de mesures soient à moyenne gaussienne nulle. Dans le cas de localisation réseau, comme c'est le cas pour les réseaux géodésiques, la redondance des contraintes permet de détecter les mesures biaisées par des tests statistiques qui permettent de détecter et d'isoler les mesures erronées « *outlier detection* ». En plus, afin de maintenir une bonne convergence le choix de la position initiale doit être assez précis, chose qui est parfois difficile à faire [57].

La technique d'estimation par maximum de vraisemblance peut être utilisée si le modèle statistique (PDF) des mesures est connu (ex. modèle gaussien, log-Normal). Son intérêt réside dans le fait que sa variance approche asymptotiquement (avec l'augmentation du rapport SNR) la borne inférieure donnée par la borne CR. Cependant, si les modèles statistiques ne décrivent pas fidèlement les mesures, les résultats ne sont pas optimaux. En plus, de même que pour la technique LS, le choix de la position initiale doit être assez précis, sinon la recherche risque de rester sur un maximum local [57] [66].

Parmi les techniques distribuées, on trouve des algorithmes utilisant des heuristiques, comme par exemple le calcul de la position en utilisant l'estimation du nombre minimal de sauts entre deux nœuds [78]. Ces algorithmes ne sont pas en général aussi efficaces au niveau précision que les autres algorithmes basés sur l'optimisation puisqu'ils n'utilisent pas toutes les contraintes données par les distances internœuds, mais leur intérêt réside dans leur simplicité au niveau calcul qui les rend bien adaptés pour certaines applications, comme dans le cas des réseaux de capteurs avec unités à faibles ressources.

Parmi les techniques de localisation coopérative distribuée basée sur approche probabiliste, il y a les travaux de Wymeersch et al. [66] qui proposent une approche probabiliste basée sur l'inférence bayésienne dans les modèles graphiques. Les auteurs utilisent une représentation basée sur les graphes de facteurs (factor graphs) pour représenter les distributions marginales des positions et des contraintes sur les positions relatives (distances, angles), en plus d'utiliser l'échange de messages entre nœuds du graphe basé sur l'algorithme somme-produit « *sum-product* ». Cet algorithme donne une représentation élégante du problème. Cependant, il peut entraîner des

résultats peu précis, si les PDFs initiales ne décrivent pas fidèlement les mesures, ou si le graphe comporte des boucles.

### 3.2.2 Algorithmes de localisation centralisée

Dans les algorithmes de localisation centralisés, après avoir collecté toutes les données nécessaires pour le traitement, le traitement se fait généralement au niveau d'un point central. Ces algorithmes peuvent être considérés comme des algorithmes de localisation coopérative centralisés, s'ils ont la caractéristique d'exploiter également les contraintes géométriques entre les nœuds qui ne sont pas des balises, généralement les distances entre les nœuds (nœud à nœud et nœud à balise). Ces algorithmes permettent d'exploiter la connectivité du réseau et la redondance des contraintes pour calculer ou améliorer la position des nœuds.

Parmi les algorithmes de localisation centralisée coopérative, il y a les algorithmes basés sur des techniques d'optimisation convexe. Ces algorithmes permettent en général d'atteindre une bonne précision sur la position en dépit des erreurs dans l'évaluation des distances inter-nœuds.

Doherty et al. [51] ont été les premiers à proposer cette technique en définissant le problème d'optimisation suivant :

$$\begin{aligned} \min \sum |\alpha_{ij}| \\ \left\{ \begin{array}{l} \|\bar{x}_i - \bar{x}_j\| = d_{ij}, \forall (i, j) \in N \\ \|\bar{x}_i - \bar{x}_j\| \geq R, \forall (i, j) \notin \bar{N} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Avec :  $d_{ij} = \hat{d}_{ij} + \alpha_{ij}$  la distance estimée par l'algorithme,  $\hat{d}_{ij}$  la distance mesurée,  $\alpha_{ij}$  l'erreur,  $R$  la portée radio,  $N$  est l'ensemble des nœuds voisins,  $\bar{N}$  est l'ensemble des nœuds non voisins.

Étant donné que plusieurs des contraintes sont non convexes, l'auteur dans [51] procède à la relaxation des contraintes simplement en les éliminant. La solution correspondante devient moins précise.

Dans [69], Gentile propose d'utiliser directement des contraintes linéaires données par les inégalités des triangles, et propose deux formulations : une centralisée et l'autre distribuée. La formulation centralisée du problème est comme suit :

$$\min \sum |\alpha_{ij}|$$

$$\begin{cases} d_{ij} + d_{jk} \geq d_{ik} \\ d_{ij} + d_{ik} \geq d_{jk} \\ d_{jk} + d_{ik} \geq d_{ij} \end{cases}, \quad \forall (i, j, k) \in M \quad (3.6)$$

Avec :  $d_{ij} = \hat{d}_{ij} + \alpha_{ij}$  la distance estimée par l'algorithme,  $\hat{d}_{ij}$  : distance mesurée,  $\alpha_{ij}$  : l'erreur,  $M$  est l'ensemble des triplets  $(i, j, k)$  telle que :  $(i, j) \in N$ ,  $(i, k) \in N$ ,  $(k, j) \in N$ ,  $N$  est l'ensemble des nœuds voisins.

L'algorithme procède en deux étapes : la première consiste à diminuer l'incertitude par rapport aux distances mesurées en utilisant la formulation précédente, puis une deuxième étape permet le calcul de la position des nœuds à partir des distances. Dans cette deuxième étape, l'auteur utilise une simple trilatération.

Afin d'évaluer l'efficacité des algorithmes, l'auteur procède à des simulations avec les paramètres suivants : 50 nœuds uniformément distribués dans une aire unité. Le nombre de nœuds références varie entre (3, 5, 7), la portée sans fil varie entre (0.2, 0.25, 0.3). Le paramètre de bruit traduit le pourcentage de bruit gaussien perturbant les mesures des distances par rapport aux distances réelles et varie entre (0, 0.1, 0.2, 0.3). Les résultats de simulation montrent que même avec des erreurs de 30% sur les distances mesurées, l'algorithme permet de diminuer l'erreur sur la distance estimée à 5%.

Les résultats de simulations annoncés montrent que cette technique permet une précision supérieure à celle des techniques précédentes [51] [67]. Cependant, l'erreur sur la position n'est pas considérée dans le calcul.

Dans [67] [70] [90] [91], des formulations de la localisation coopérative centralisée sous forme d'un problème d'optimisation (SDP) sont proposées.

En guise de conclusion pour cette section, on peut noter que le problème de localisation coopérative centralisée admet plusieurs formulations sous forme de problème d'optimisation. Ces algorithmes permettent d'optimiser d'une façon globale les positions ou distances relatives et permettent

d'éviter le problème de propagation des erreurs. Cependant ces algorithmes ont leurs propres limites.

Parmi les principales limites, il y a la mise à l'échelle par rapport à la charge de communication. En effet, comme pour tout modèle de calcul centralisé, lorsque le nombre de nœuds augmente, la charge de communication au niveau du réseau et la charge de calcul au niveau du nœud central augmentent, il y a en plus le risque de panne au niveau du nœud central. Au niveau des outils de calcul, il y a aussi les limites des outils actuels (programme d'optimisation convexe) [90].

### 3.3 Erreurs de localisation

#### 3.3.1 Définitions

Pour évaluer la performance d'une technique de localisation, et d'une façon plus générale, pour décrire la qualité d'une mesure, les termes erreurs, exactitude (*accuracy*) et précision (*precision*) sont souvent utilisés. Bien que l'usage de ces termes soit très répandu, leurs définitions restent souvent ambiguës [33] [35].

Tout d'abord, le terme erreur (erreur totale) désigne la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence. Les erreurs peuvent être dues à des erreurs de modélisation (ex. limite du domaine de validité du modèle) ou à des erreurs sur les mesures fournies par les différents capteurs. Cette erreur comprend deux composantes : l'erreur systématique et l'erreur aléatoire. L'erreur systématique est une composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesures répétées, demeure constante ou varie de façon prévisible. Alors que l'erreur aléatoire est une composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesures répétées, varie de façon imprévisible. Les erreurs dites aléatoires causent généralement une dispersion des résultats. Un traitement statistique permet de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée et de fixer les limites de l'incertitude [33].

La définition proposée par l'organisation internationale de normalisation (ISO) [35] associe la précision aux erreurs aléatoires, les erreurs systématiques sont associées à la justesse (*trueness*) et l'exactitude est défini comme étant la combinaison de la justesse et de la précision. Les termes exactitude, précision et justesse sont des caractéristiques de performance qualitative de l'erreur,

dont les valeurs numériques sont données par les mesures d'incertitude, écart-type et biais. Dans la suite, nous donnons les définitions de ces termes.

**Exactitude (*accuracy*)** : l'exactitude de mesure est définie comme étant " l'étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie de la grandeur que l'on veut mesurer." Autrement dit elle désigne à quel point une mesure se rapproche de la valeur réelle.

**Précision (*precision*)** : la précision de mesure est définie comme étant " l'étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées." En général elle est exprimée numériquement par l'écart-type.

**Justesse de mesure (*trueness*)** : la justesse de mesure est définie comme étant " l'étroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence." L'erreur systématique est associée à la justesse.

Si l'erreur systématique (biais) est égale à zéro, alors la précision est égale à l'exactitude.

Dans cette thèse, les deux termes précision et exactitude sont utilisés de manière interchangeable, étant donné que dans l'étude des erreurs de localisation on peut toujours supposer que la mesure est exempte d'erreurs systématiques, c-à-d que le biais nul (capteur étalonné).

### 3.3.2 Modélisation des incertitudes

Il existe plusieurs approches pour modéliser les incertitudes. Le choix du modèle est important dans la mesure où c'est ce choix qui détermine le modèle mathématique et la méthode pour estimer et fusionner les données. On distingue deux grandes catégories d'approches :

- **Les approches probabilistes** : se basent sur la théorie des probabilités, donc une variable aléatoire est représentée par une loi de densité de probabilité. Cette modélisation a plusieurs avantages. En plus de la richesse des outils de la théorie des probabilités, tels que les méthodes d'inférence bayésienne (qui s'appuie sur le théorème de Bayes). Les algorithmes sont capables de fournir une estimation ponctuelle qui représente le point le plus probable.

L'approche probabiliste nécessite la connaissance des lois ou propriétés probabilistes des variables aléatoires (PDF, fonction de densité de probabilité). La fonction de densité de



probabilité d'une variable aléatoire peut être estimée en utilisant des méthodes paramétriques dans lesquelles la PDF est choisie à l'avance (ex. gaussien, densité-mélange), puis on cherche à déterminer les paramètres qui définissent la fonction (ex. moyenne, variance).

L'autre catégorie est les méthodes non paramétriques (ex. méthode d'estimation par noyau, par histogramme, k-plus proches voisins, etc.).

Pour obtenir une PDF qui décrit le plus fidèlement possible la variable aléatoire, les méthodes non paramétriques restent plus appropriées; toutefois, elles nécessitent généralement un nombre d'échantillons important de valeurs de cette variable.

- **Les approches ensemblistes :** l'approche ensembliste ne nécessite aucune information statistique similaire (PDF). La seule hypothèse à vérifier est que toutes les erreurs sont bornées. Dans l'approche ensembliste, l'état (ici le vecteur de position) est traité comme un ensemble garanti de valeurs possibles contenues dans un domaine initial que l'on cherche à réduire le plus possible. L'estimation de l'état est garantie sous la forme d'un ensemble particulier de  $R^n$  (appelé intervalle en 1D, boîte ou polygone en 2D).

Le domaine de présence d'un nœud peut être caractérisé en 2D par un polygone ou une boîte. De plus, le nombre de points nécessaires pour caractériser le domaine de présence est constant par rapport à la taille du domaine. L'analyse par intervalle qui est une forme d'application de l'approche ensembliste permet d'introduire un formalisme et des outils qui permettent de garantir le résultat (dans un intervalle ou un vecteur intervalle), une facilité de manipulation des incertitudes. Cependant, l'analyse par intervalle nécessite l'approximation du domaine de présence par un rectangle (boîte ou vecteur intervalle en 2D), ce qui est moins efficace que de l'approximer par un polygone. Par contre l'inconvénient, de cette approche est qu'elle donne parfois des évaluations pessimistes du domaine de présence.

### 3.3.3 Évaluation des erreurs

- Pour la méthode ensembliste, afin de caractériser la précision des approches proposées, nous utiliserons le diamètre maximal du polygone ainsi que son aire. Donc, l'erreur de localisation sera calculée par le demi-diamètre maximal du polygone.

- L'erreur quadratique moyenne ou sa racine carrée (RMS) sont couramment utilisées pour l'évaluation des erreurs d'estimation. Le RMS mesure la différence entre les valeurs estimées et les valeurs réelles :

$$M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (3.7)$$

Pour les approches probabilistes, la borne de Cramér-Rao (BCR) est un outil statistique qui donne l'expression de la variance minimale que l'on peut atteindre pour un paramètre estimé. En connaissant la valeur du BCR, on peut connaître la performance ultime qu'un estimateur peut atteindre. De cette façon, même si l'on choisit un estimateur sous optimal la comparaison de cet estimateur avec la BCR permet de mieux mettre en perspective les compromis performance/coût. En effet, la connaissance de la BCR permet de quantifier le gain possible en variance et l'éventuel surcoût de calcul qui en résulterait. L'expression de la BCR est donnée par la formule (3.8).

Quel que soit l'estimateur non biaisé  $\hat{\theta}$ , sa variance vérifie [57] :

$$Var(\hat{\theta}) \geq \frac{1}{E \left\{ \left( \frac{\partial \ln p(\mathbf{x}; \theta)}{\partial \theta} \right)^2 \right\}} \quad (3.8)$$

Avec :  $p(\mathbf{x}; \theta)$ , une fonction de densité de probabilité.

Si on prend l'exemple d'un signal direct (sans multichemins) avec bruit gaussien blanc, la borne de Cramér-Rao nous donne la variance minimale que l'on peut atteindre pour ToA [57] :

$$Var(ToA) \geq \frac{1}{8\pi^2 B \cdot T_s \cdot F_c^2 \cdot SNR} \quad (3.9)$$

Avec : B la bande passante, supposée inférieure à la fréquence centrale  $F_c$ ,  $T_s$  est la durée du signal, SNR est le rapport signal bruit supposé constant sur B.

On remarque immédiatement que pour améliorer l'exactitude de l'estimation du temps d'arrivée TOA, on peut régler les paramètres B,  $T_s$ ,  $F_c$  et SNR.

### 3.4 Sources d'incertitudes de localisation

On distingue principalement les sources d'incertitudes suivantes :

- Facteurs liés au signal : canal de transmission (NLOS, SNR, etc.), synchronisation.
- Facteurs liés aux techniques d'estimation de la position utilisées
- Facteurs liés à la configuration géométrique des nœuds références par rapport au nœud capteur « GDOP ».

Les facteurs liés au signal et au canal de transmission sont traités dans la littérature [73] [57] [66]. Nous donnons dans le paragraphe qui suit une présentation sommaire de ces facteurs, l'étude détaillée de ces problématiques sort du cadre de ce projet thèse.

Nous allons nous intéresser dans cette thèse plutôt aux facteurs liés aux techniques d'estimation de la position et la propagation des incertitudes [74] [73].

#### 3.4.1 Facteurs liés au canal de transmission

Les facteurs liés au canal de transmission ont différents degrés d'influence sur la précision des mesures de distance dépendamment des conditions et du milieu physique de propagation. On trouve principalement les facteurs suivants : trajet indirect (« non line-of-sight » ou NLOS), multitrajet, rapport signal bruit (SNR), interférences dues aux l'accès multiple.

- Le facteur du trajet non direct (NLOS) est de loin l'un des paramètres qui ont le plus d'influence sur la précision de mesure de la distance (aussi sur l'angle d'arrivée). Dans le cas d'absence du trajet direct (NLOS), souvent le premier signal arrivé ne représente pas la vraie distance car un délai additionnel s'ajoute au temps d'arrivée. Le cas du trajet non direct (NLOS) est rencontré plus souvent dans les applications intérieures. Afin d'étudier ces erreurs, il est important de connaître leurs distributions ou leurs bornes supérieures. Dans sa thèse sur la localisation coopérative dans un environnement intérieur avec signaux UWB, Alsindi [73] étudie spécifiquement le problème de distribution des erreurs (LOS/NLOS) et propose des modèles de fonction de distribution pour trois types de liens : (I.) lien direct (LOS) (II.) NLOS – avec lien direct (qu'il a appelé NLOS-DP « NLOS-with Direct Path »), et (III.) NLOS – sans lien direct (NLOS-NDP « NLOS-With No Direct Path »).

Plusieurs recherches ont été publiées sur les techniques qui visent à détecter et diminuer l'influence des erreurs dues au trajet non direct. La plupart de ses techniques supposent que seulement une faible partie des mesures sont affectées par le NLOS. Afin d'identifier si on est en présence d'un signal sans ligne de vue, la méthode la plus simple est le test de variance [57]. D'autres techniques plus élaborées sont proposées dans [57]. Sans information sur la PDF des mesures NLOS, il est difficile d'estimer la distance avec précision. Parmi les autres paramètres qui influencent la précision des mesures, il y a le rapport signal sur bruit (SNR), qui cause une dégradation de la précision [66].

### 3.4.2 Affaiblissement géométrique de précision (GDOP)

La notion d'affaiblissement géométrique de précision (Geometric Dilution Of Precision, 'GDOP') décrit la relation entre l'incertitude des mesures des paramètres d'entrée (mesure de distance) et l'incertitude de l'estimation de la position finale. Une géométrie favorable est une distribution uniforme des balises autour du mobile. Autrement dit, le mobile doit être idéalement au centre du polygone régulier dont les sommets sont les balises [55].

D'après la figure 3.4, on peut facilement remarquer que l'incertitude de localisation (en jaune) varie considérablement selon la configuration géométrique des balises par rapport au mobile.

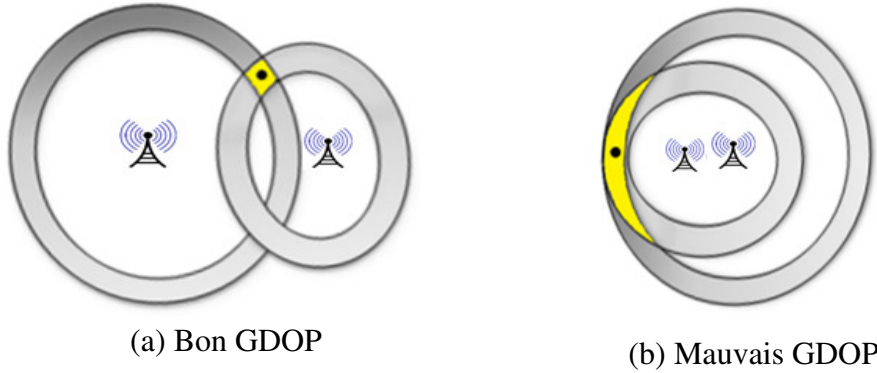


Figure 3.4 Exemples d'affaiblissement géométrique de précision

Elle peut être formalisée comme suit :

$$GDOP = \frac{RMSE_{pos}}{RMSE_{range}} = \frac{\sqrt{E \{ (\hat{\theta} - \hat{\mu})^T (\hat{\theta} - \hat{\mu}) \}}}{\sigma_{range}} \quad (3.10)$$

## **CHAPITRE 4**

### **LOCALISATION COOPÉRATIVE BASÉE SUR APPROCHE ENSEMBLISTE**

Dans ce chapitre, nous proposons deux nouveaux algorithmes de localisation coopérative basée sur une approche ensembliste. Le premier algorithme, appelé CLES (Cooperative Localization with Enhanced Set-membership), constitue un cadre général pour la localisation coopérative basée sur l'approche ensembliste qui permet d'améliorer la précision de localisation. Plus spécifiquement, l'algorithme proposé utilise les contraintes de positions relatives (ex. distances) entre les nœuds pour réduire les domaines de présence donnés par une technique de localisation initiale (ex. Cell-id, GNSS, etc.).

Ensuite, nous proposons l'algorithme CLEF (Cooperative Localization with Enhanced Fingerprinting), comme application de l'algorithme CLES à la localisation par approche des signatures. Les résultats numériques démontrent l'efficacité des approches proposées pour améliorer la précision de localisation.

#### **4.1 Introduction**

La localisation coopérative est une méthode qui exploite les positions relatives, nœud à nœud et nœud à balise, pour améliorer la précision de localisation. En cela, elle étend l'approche classique limitée à la localisation des nœuds par rapport à des balises fixes (un seul saut), à une localisation multisauts. En effet, les méthodes classiques de localisation calculent la position en utilisant les mesures de signal (RSS, ToA, AoA) par rapport à des balises fixes (nœuds avec des positions connues), ce qui nécessite une communication directe entre le nœud et les balises. En exploitant les positions relatives nœud à nœud, la localisation coopérative permet d'améliorer la couverture et la précision. Avec la prolifération des téléphones mobiles et des réseaux et systèmes embarqués (réseau ad hoc, réseau de capteurs, Internet des objets) qui seront de plus en plus équipés d'interfaces sans fil avec capacité de communication ad hoc et la mesure de la position relative (ex. IEEE 802.15.4a), la localisation coopérative occupera une place centrale parmi les techniques de localisation.

Toutefois, plusieurs facteurs peuvent influencer la performance de la localisation coopérative, tels que : les facteurs liés aux techniques d'estimation des paramètres (RSS, ToA, TDOA, AoA) et de la position; les facteurs liés à la topologie du réseau comme la dilution géométrique de précision (GDOP), la densité des nœuds et le nombre de balises (nœuds d'ancrages); les facteurs liés au canal de propagation comme les trajets multiples, l'ombrage, les liens non directs, etc.

Par ailleurs, la localisation par approche des signatures exploite la corrélation entre les signaux radio et la position. L'avantage principal de cette technique est qu'elle ne nécessite pas une infrastructure dédiée pour la localisation. En effet, cette technique exploite les signaux des réseaux sans fil déjà déployés (WLAN, cellulaire, etc.) ; par conséquent, elle n'exige pas la modification au niveau matériel, que ce soit au niveau du réseau ou de l'unité mobile. En revanche, cette technique présente également certaines limites. En effet, en plus du problème de précision de localisation, la mise à jour de la base de données des signatures est généralement faite hors ligne et elle n'est pas automatique; elle nécessite généralement l'intervention d'un opérateur dans le processus de collecte de données (paires signature de signal – position), et du calibrage et recalibrage de la base de données quand il y a un changement majeur dans l'environnement de propagation, ce qui rend le processus long et coûteux.

Dans ce chapitre, nous proposons l'utilisation de l'algorithme CLEF (Cooperative Localization with Enhanced Fingerprinting), comme application de l'algorithme CLES à la localisation par approche des signatures. L'algorithme CLEF permet de combiner les deux techniques de localisation : l'approche coopérative et l'approche des signatures d'une façon complémentaire. En effet, dans la phase de collecte des couples signature – position, l'unité mobile peut saisir l'opportunité d'une bonne configuration géométrique des nœuds et la bonne précision des distances internœuds, pour la mise à jour des mesures de signal (signatures) dans la base de données (BD) des signatures. Durant la phase de localisation, les polygones (données signature- position) sont utilisés dans la localisation coopérative basée sur l'approche ensembliste donnée par l'algorithme CLES.

## 4.2 Revue de littérature

### 4.2.1 Localisation par approche ensembliste

Mourad et al. [68] proposent un algorithme de localisation pour unité mobile basé sur une approche ensembliste, appelé algorithme de localisation avec boîtes garanties (GBL) « Guaranteed boxed localization Algorithm ». L'algorithme utilise la technique d'analyse par intervalle pour la propagation de contraintes définies par le modèle de mobilité du nœud et l'information de localisation donnée par les nœuds références (balises). Il se déroule en deux étapes, à chaque période de temps : une étape de propagation et une étape de réduction (contraction). Dans la première étape, le mobile est tout d'abord localisé dans un rectangle, appelé région initiale. La vitesse maximale du mobile est utilisée pour propager la région initiale en utilisant l'équation de mobilité et l'arithmétique d'intervalles. L'étape de réduction consiste à appliquer, d'une façon itérative, des intersections avec les domaines (disques) définis par les distances mobile-références et le domaine défini par l'équation de mobilité. Ce qui permet de réduire le domaine de présence. Cet algorithme est comparé à une approche probabiliste basée sur l'algorithme Monte-Carlo MCB (Monte-Carlo localisation for mobile wireless sensor networks). Les auteurs démontrent que l'algorithme GBL permet une plus grande précision avec moins de ressources en termes de mémoire et de calcul. Parmi les limites de l'algorithme GBL, nous soulignons, la supposition qu'à chaque instant, le nœud accède à trois références, ce qui n'est pas toujours possible dans la réalité. Dans la solution de localisation coopérative basée sur approche ensembliste que nous proposons dans ce chapitre, nous exploitons les contraintes additionnelles données par les nœuds voisins. Cela permet d'étendre la couverture et d'améliorer la précision de localisation. Par ailleurs, dans l'étape de réduction, l'algorithme GBL calcule la boîte (rectangle) qui inclut les intersections entre les domaines de présence. Même si cette approche simple est justifiée par l'utilisation de l'analyse par intervalles, elle est moins efficace au niveau du filtrage des domaines continus que l'approche basée sur les polygones [74].

Heusch [74] étudie la résolution d'un problème de déploiement d'antennes. L'objectif est de trouver la position des antennes radio tout en respectant un certain nombre de contraintes, comme les contraintes de localisation (zones permises zones interdites) et les contraintes liées à la qualité de service (ex. respect des contraintes d'interférences). C'est un problème d'optimisation linéaire de type mixte, dont les variables relatives au déploiement (positions des antennes) sont de type

continu, et celles portant sur l'allocation de fréquences sont de type entier. La nécessité de prendre en compte simultanément ces deux aspects, avec contraintes discrètes et continues, entraîne que les méthodes classiques de programmation par contraintes (PPC) ne sont pas exploitables. L'auteur propose une contrainte globale, qui maintient des relations de distance euclidienne entre les nœuds. Il propose également un algorithme inspiré d'un algorithme de "placement des cercles" (circle packing) proposé initialement par Markot [89] basé sur les polygones et qui permet un filtrage (réduction) plus efficace que celui des boîtes [74].

#### **4.2.2 Localisation par approche des signatures**

Dans [96] [95], les auteurs présentent des algorithmes de localisation par approche des signatures basée sur les polygones pour la localisation dans les réseaux cellulaires comme le réseau LTE. L'approche commence par une étape standard de collecte des couples position-signature. Les positions sont données par GPS assisté (A-GPS) ou par la localisation basée sur le réseau comme la technique de différence de temps d'arrivée observée (OTDOA), l'identifiant de cellule (CID), la puissance de signal reçu (RSS), le temps d'arrivée (TA) ou l'angle d'arrivée (AoA). Dans une seconde étape, toutes les mesures qui ont la même signature de signal sont rassemblées pour former une grappe. Ainsi, plusieurs grappes de signatures de signal couvrant le réseau cellulaire sont générées. Ensuite, l'algorithme calcule le polygone minimal qui décrit la limite de chaque grappe. En plus, pour améliorer la précision de classification, l'algorithme utilise le "lissage de grappe", par la suppression des valeurs aberrantes et le fractionnement de grappe, ce qui réduit à la fois leurs dimensions et les irrégularités. Enfin, les polygones voisins ayant la même signature sont fusionnés pour avoir un seul polygone correspondant à la signature. Lors de l'étape d'exploitation, la table de correspondance signature-position (polygone) est utilisée pour le positionnement. Ainsi, la signature de signal radio mesurée est utilisée pour trouver le polygone unique correspondant, qui est envoyé à l'utilisateur comme résultat de localisation (domaine de présence du nœud).

Toujours dans le cadre de la localisation basée sur l'approche des signatures dans les réseaux cellulaires, un algorithme pour calculer la transformation polygone-ellipse est proposé dans [94]. Cette transformation permet de préserver l'intervalle de confiance entre les deux formes.

D'autres travaux utilisent l'approche ensembliste basée sur l'analyse par intervalle pour la localisation robuste des robots [98], et la localisation GPS avec un niveau d'intégrité [99].



### 4.3 Formulation du problème

Les travaux présentés dans la section précédente ne permettent pas d'exploiter les avantages des deux techniques de localisation coopérative et de l'approche des signatures. Afin d'améliorer la précision de localisation, nous proposons dans ce chapitre, un nouvel algorithme qui permet d'utiliser les deux techniques d'une façon complémentaire, en s'appuyant sur une approche ensembliste basée sur les polygones.

Nous considérons  $n$  nœuds  $p_i$ , qui peuvent être des nœuds statiques (par exemple dans un réseau de capteurs fixe) ou mobiles (usagers avec des téléphones mobiles). Toutefois, sans limiter la généralité de ce qui suit, nous considérons que les nœuds sont fixes au moment de l'application de l'algorithme. Les résultats peuvent cependant facilement se généraliser au cas mobile.

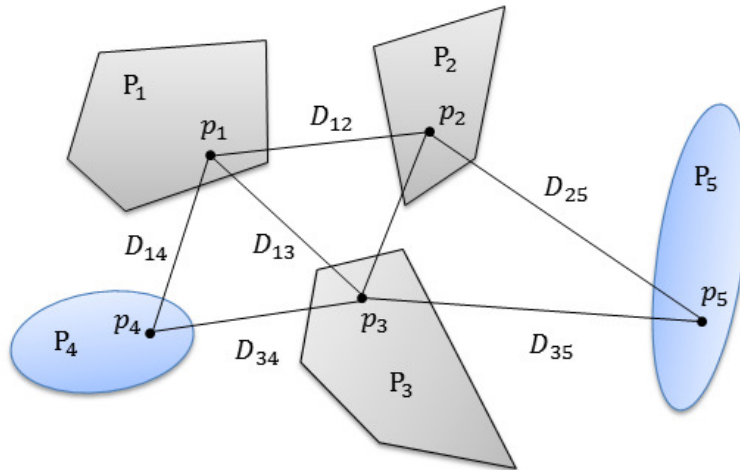


Figure 4.1 Domaines de présence et contraintes de distances.

Nous supposons que les nœuds disposent de modules sans fil qui leur permettent de mesurer les distances relatives et les domaines de présence initiaux. Nous appelons domaine de présence, le domaine défini par une forme géométrique (ex. polygone) qui délimite la zone de présence du nœud  $p_i$ . En pratique, ces domaines peuvent être donnés par divers techniques de localisation, comme l'approche des signatures qui permet de générer des domaines sous forme de polygone [94], ou la localisation par système GNSS (ellipse) tel qu'illustrée au niveau de la figure 4-1. Notons que pour traiter les ellipses dans le cadre de l'approche ensembliste, on peut prendre une approximation de l'ellipse  $3\sigma$  par un polygone englobant [95].

Pour les distances relatives, elles peuvent être données par des techniques basées sur les mesures temporelles ToA, comme la technique ultra large bande (UWB), ou la technique de puissance de signal RSS.

Le problème peut être formulé comme suit : soit  $n$  nœuds  $\{p_i\}$  qui appartient aux polygones  $\{P_i\}$ . Soit la distance  $D_{ij}$  entre les nœuds  $p_i$  et  $p_j$  avec le modèle d'incertitude bornée. Avec :  $D_{ij} \in [D_{ij_{min}}, D_{ij_{max}}]$  et  $\Delta D_{ij} = D_{ij_{max}} - D_{ij_{min}}$ . Ensuite, on cherche à réduire l'aire d'incertitude du polygone  $P_i$ , autrement dit, le domaine de présence des nœuds  $p_i$ , en utilisant les contraintes des distances  $D_{ij_{min}}$  et  $D_{ij_{max}}$ .

## 4.4 Description de l'algorithme CLES

Dans cette section, nous présenterons notre algorithme de localisation CLES (Cooperative Localization with Enhanced Set-membership).

Comme le montre l'organigramme de la figure 4.2, l'algorithme CLES se compose des étapes suivantes :

- Étape d'initialisation qui consiste à lire les données générées par les modules de mesure des distances inter-nœuds et des domaines de présence. Ces données se présentent sous forme d'intervalles qui représentent les incertitudes des mesures de distances, et les polygones qui représentent les domaines de présence des nœuds.
- Une étape d'optimisation qui consiste à réduire, au besoin, les incertitudes sur les distances mesurées en appliquant un algorithme d'optimisation tel que décrit au chapitre 3 (section 3.2.2).
- Étape de réduction des polygones basée sur les distances maximales. Cette étape sera détaillée dans l'algorithme 1 (voir ci-dessous).
- Étape de réduction des polygones basée sur les distances minimales. Cette étape sera détaillée dans l'algorithme 2 (voir ci-dessous).
- Un premier test pour voir si l'incertitude sur les distances  $\Delta D_{ij} = D_{ij_{max}} - D_{ij_{min}}$  est inférieure à un seuil  $\varepsilon$  donné.

- Un deuxième test pour voir si la variation des aires des polygones  $\Delta S_i$  est supérieure à un seuil donné  $\varepsilon'$ . Sinon l'algorithme prend fin.

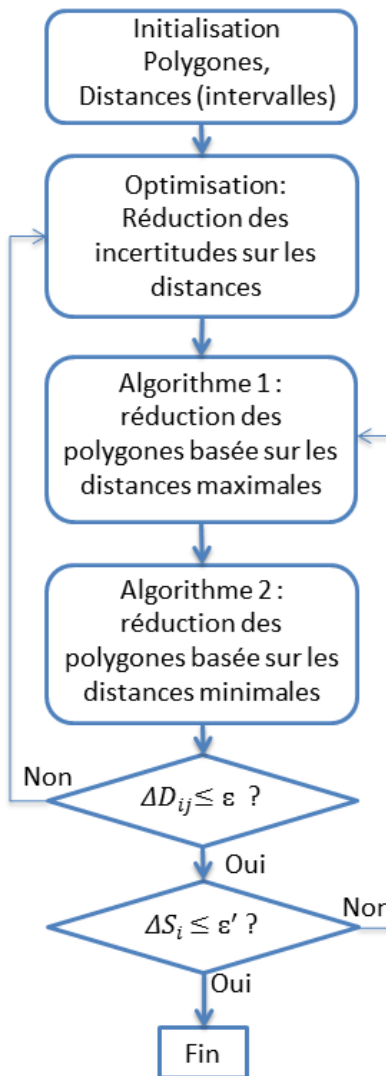


Figure 4.2 Organigramme de l'algorithme CLES.

#### 4.4.1 Réduction des polygones basée sur les distances maximales

L'objectif de cette étape est de réduire un polygone  $Poly_i$  en utilisant un autre polygone  $Poly_j$  et la distance maximale  $D_{ij_{max}}$  qui sépare les deux nœuds  $i$  et  $j$ .

Pour ce faire, nous calculons un nouveau polygone  $Poly''_j$  qui englobe l'aire située à une distance maximale  $D_{ij_{max}}$  de  $Poly_j$ . Cela représente la dilatation du polygone  $Poly_j$  par la distance  $D_{ij_{max}}$ , appelée également décalage de polygone (polygon offsetting) ou somme de Minkowski du

polygone  $Poly_j$  avec le disque de rayon  $D_{ij_{max}}$ . Le polygone  $Poly''_j$  peut être calculé d'une façon efficace en utilisant la méthode d'indice [32].

Ensuite, on calcule l'intersection de  $Poly_i$  avec  $Poly''_j$  pour obtenir finalement le polygone réduit  $Poly'_i$ , comme montré dans la figure 4.3.

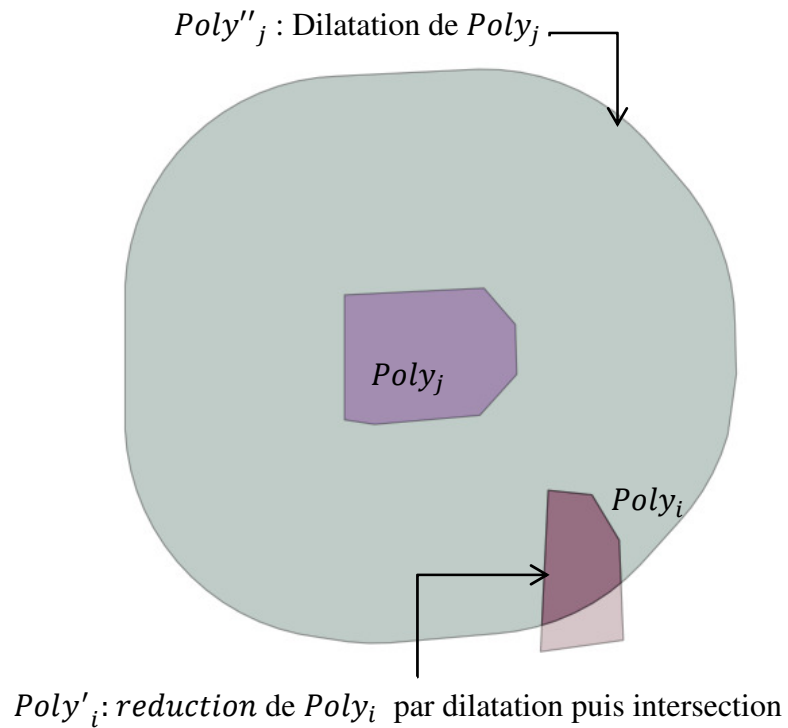


Figure 4.3 Réduction de polygone basée sur la distance maximale.

L'algorithme 1 est expliqué plus en détail dans ce qui suit.

Algorithme 1 : réduction de polygone basée sur la distance maximale	
<p>Entrées : distance maximale <math>d_{max}</math>,</p> <p>Polygone à réduire <math>Poly_i = (b_1, b_2, \dots, b_N)</math>,</p> <p>Polygone réducteur <math>Poly_j = (a_1, a_2, \dots, a_q)</math></p> <p>Sorties : <math>Poly'_i</math> le reste de la réduction de <math>Poly_i</math></p>	
1	<p>Dilatation de polygone : Calculer la dilation du polygone <math>Poly_j</math> par méthode d'indice ou la somme de Minkowski du polygone <math>Poly_j</math> avec le cercle centré de rayon <math>d_{max}</math>. Retourner le polygone <math>Poly''_j</math>.</p>
2	<p>Calculer l'intersection entre le polygone <math>Poly''_j</math> et le polygone <math>Poly_i</math></p> $Poly'_i = Poly_i \cap Poly''_j$
3	<p>Retourner le polygone <math>Poly'_i</math></p>

#### 4.4.2 Réduction des polygones basée sur les distances minimales

L'objectif de cette étape est de réduire un polygone  $Poly_i$  en utilisant un polygone  $Poly_j$  et la distance minimale  $D_{ij_{min}}$  qui sépare les deux nœuds  $i$  et  $j$ . Pour ce faire, nous appliquons l'algorithme 2. L'algorithme 2 a été initialement proposé par Markot [89] pour réduire les aires actives dans un problème de "placement des cercles" (circle packing). Cet algorithme permet de réduire l'aire d'un polygone en utilisant deux contraintes, à savoir la distance minimale  $D_{min}$  et un polygone réducteur  $Poly_j$ . Comme illustré dans la figure 4.4, tout d'abord, l'algorithme procède par l'étiquetage des nœuds en comparant les distances entre sommets des deux polygones  $Poly_j$  et  $Poly_i$  avec la distance minimale  $D_{min}$ . Les sommets à éliminer sont étiquetés (-). L'algorithme calcule les deux points limites  $p_1$  et  $p_k$  qui sont l'intersection des segments  $\overline{p_0 p_2}$  et  $\overline{p_{k-1} p_{k+1}}$  avec les cercles dont le rayon est  $D_{min}$  et les centres sont les sommets de  $Poly_j$ .

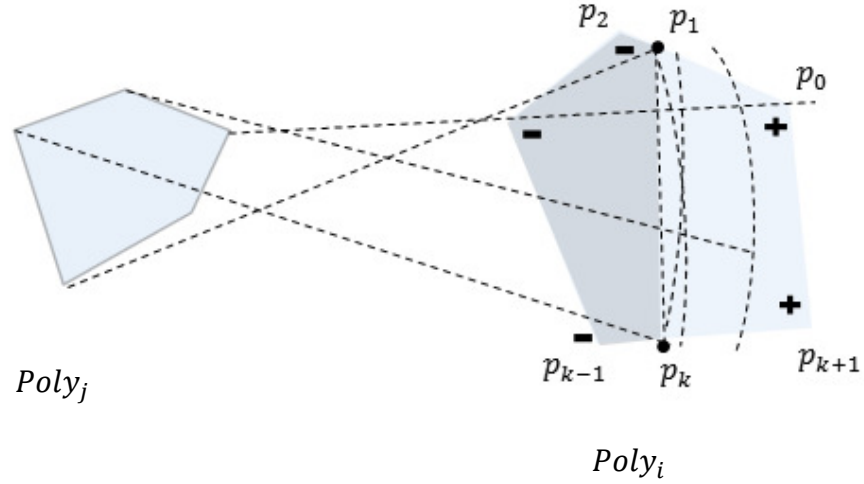


Figure 4.4 Réduction de polygone basée sur la distance minimale.

L'algorithme 2 est expliqué plus en détail dans ce qui suit.

Algorithme 2 : réduction de polygone basée sur la distance minimale

Entrées : distance minimale  $d_{min}$ ,

Polygone à réduire  $Poly_i = (b_1, b_2, \dots, b_N)$ ,

Polygone réducteur  $Poly_j = (a_1, a_2, \dots, a_q)$

Sorties :  $Poly'_i$  le reste de la réduction de  $Poly_i$

- 1 Pour  $n := 1$  à  $N$  faire
  - si  $(distance(b_n, a_m) < d_{min}, \forall m = 1, \dots, q)$  alors  $Étiquette(b_n) = (-)$
  - sinon  $Étiquette(b_n) = (+)$
- si  $(Étiquette(b_n) = (-), \forall n = 1, \dots, N)$
- 3 retourner : pas de solution
- 4 sinon si  $(étiquette(b_n) = (+), \forall n = 1, \dots, N)$
- retourner :  $Poly_i$
- 5 sinon
  - Trouver une chaîne de nœuds  $p_2, \dots, p_{k-1}$  avec  $Étiquette(-)$
  - Appeler  $p_0$  le point étiqueté  $(+)$  précédent  $p_2$
  - 6 Appeler  $p_{k+1}$  le point étiqueté  $(+)$  suivant  $p_{k-1}$
  - 7 Calculer un point  $p_1$  sur le segment  $\overline{p_0 p_2}$  tel que  $distance(p_1, a_m) < d_{min}, \forall m = 1, \dots, q$
  - 8 Calculer un point  $p_k$  sur le segment  $\overline{p_{k-1} p_{k+1}}$  tel que  $distance(p_k, a_m) < d_{min}, \forall m = 1, \dots, q$ .
  - 9 Retourner le polygone  $Poly'_i$  donné par les nœuds consécutifs  $p_1, p_k, p_{k+1}, \dots, p_{N-k+2}$

## 4.5 Méthodologie pour l'évaluation des algorithmes CLES et CLEF.

### 4.5.1 Paramètres d'évaluation

Dans l'approche ensembliste, la précision de localisation peut être caractérisée par le diamètre maximal du polygone. En effet, le demi-diamètre maximal correspond à l'erreur maximale de localisation. La précision est d'autant plus grande que le diamètre maximal du polygone est plus petit. L'aire du polygone permet également de caractériser d'une façon globale la précision de localisation. Afin d'évaluer la performance des algorithmes CLES et CLEF au niveau de la précision, nous évaluerons la réduction du diamètre maximal et de l'aire du polygone en fonction des paramètres suivants :

- Nombre de polygones réducteurs.
- Configuration géométrique (HDOP, Horizontal Dilution Of Precision) : configuration géométrique des nœuds appartenant aux polygones réducteurs et du polygone à réduire.
- Proximité de la frontière : évalue si la distance entre deux nœuds appartenant à deux polygones est proche de la distance maximal ou minimal entre ces deux polygones.
- Incertitude sur les mesures de distances (Delta).

Pour ce faire, nous avons développé sous python un simulateur où nous avons implémenté les algorithmes 1 et 2, en plus des modules nécessaires pour l'affichage et la génération des résultats pour les deux algorithmes CLES et CLEF.

### 4.5.2 Algorithme CLES

Pour l'algorithme CLES, nous avons choisi un scénario simple de 25 polygones (tuiles carrées), comme montré dans la figure 4.5, avec polygone à réduire placé au centre. Notons que les nœuds sont choisis d'une façon aléatoire à l'intérieur des polygones. Ce scénario simple permet de bien caractériser la réduction de l'incertitude en fonction des paramètres susmentionnés. La figure 4.6 montre un scénario de 4 polygones, dont trois polygones réducteurs qui jouent le rôle de balises, et un polygone à réduire, en plus du polygone réduit qui représente le résultat de la réduction.

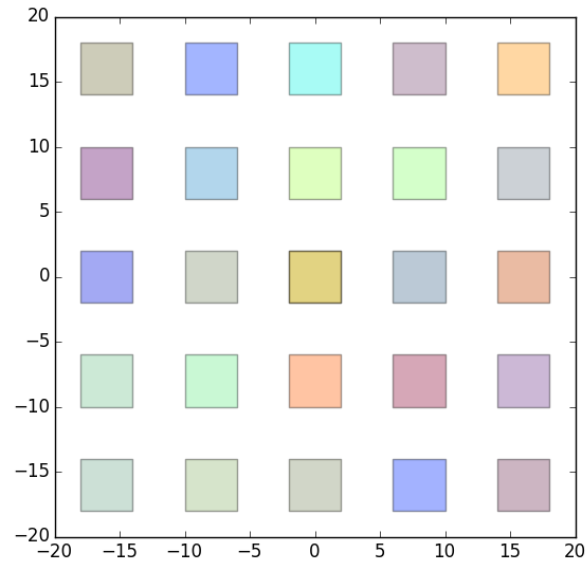


Figure 4.5 Scénario pour étudier l'algorithme CLES.

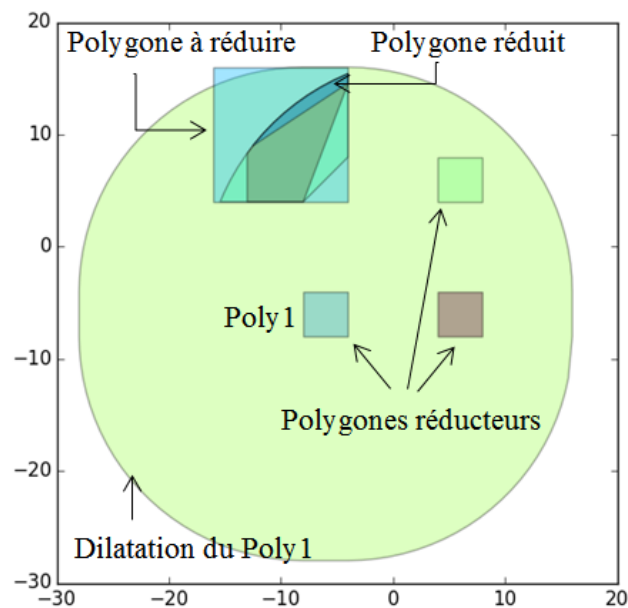


Figure 4.6 Scénario avec 4 polygones.

### 4.5.3 Algorithme CLES et Signatures de Signal

Afin d'appliquer l'algorithme CLES au contexte de localisation par signatures de signal, nous proposons l'algorithme CLEF (Cooperative Localization with Enhanced Fingerprinting). La principale différence avec l'algorithme CLES est l'ajout d'une étape de génération de polygones



qui représentent les signatures de signal de la zone couverte. Pour ce faire, nous avons effectué des mesures de puissances de signal (WiFi) dans un environnement intérieur, en utilisant le logiciel HeatMapper de la compagnie Ekahau [56]. Le logiciel HeatMapper permet de créer une carte détaillée de la couverture Wi-Fi (prends en charge les normes IEEE 802.11n/a/b/g). En effet, lors du parcours, pour chaque position sur la carte indiquée par l'opérateur, le logiciel enregistre les puissances du signal de tous les points d'accès. Ensuite, en utilisant un modèle de propagation et l'interpolation, le logiciel permet d'estimer les valeurs de puissance du signal entre deux points de mesure. C'est ainsi que le logiciel permet de générer une carte de couverture de chaque point d'accès Wi-Fi (voir figure A.2). De plus, le logiciel permet de visualiser le résultat sous forme de plages de couleurs, chaque couleur correspondant à une plage de puissance donnée (voir Annexe A). Ensuite, en utilisant les polygones définis par les plages de couleurs de chaque point d'accès Wi-Fi, on calcule l'intersection de tous les polygones pour former ainsi une carte qui représente l'ensemble des couples polygone-signature de la zone parcourue, comme illustré au niveau de la figure 4.7. Par ailleurs, nous soulignons que cette carte représente un exemple de l'approche standard de localisation par signatures de signal basée sur les polygones [95] [96].

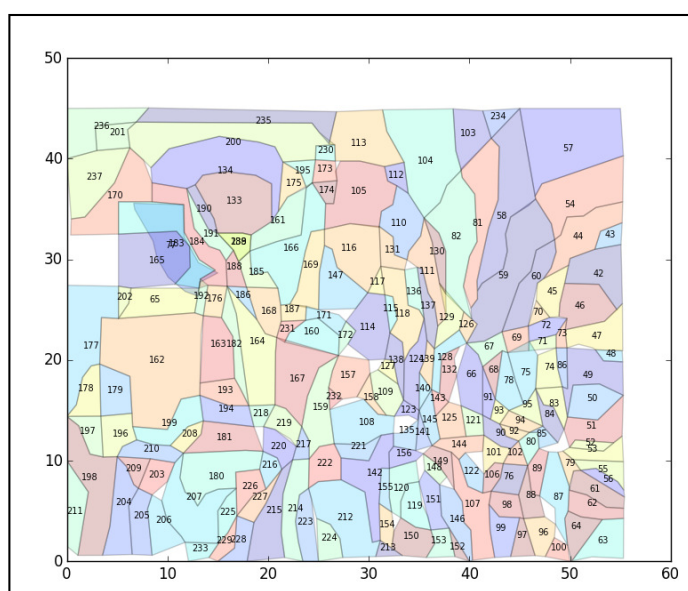


Figure 4.7 Génération des polygones qui représentent les signatures de signal.

Ainsi pour appliquer l'algorithme CLEF, après avoir généré la base de données (BD) des couples polygone-signature, dans la phase exploitation, chaque nœud mesure les signaux Wi-Fi des points d'accès puis cherche le polygone correspondant à la signature dans la BD. Ensuite, afin d'améliorer

la précision de localisation, les polygones trouvés ainsi que les distances entre nœuds sont appliqués comme entrée pour l'algorithme CLES.

Pour évaluer la performance de l'algorithme CLEF au niveau précision en fonction des paramètres définis dans la section 4.6.1, on utilise notre simulateur en positionnant d'une façon aléatoire un certain nombre de nœuds au niveau de la carte présentée au niveau de la figure 4.7. Les résultats de simulation sont présentés dans la section suivante. Ces résultats représentent la moyenne de 20 simulations pour chaque paramètre étudié.

## 4.6 Résultats et analyse

Dans cette section, nous présentons et examinons les résultats de l'évaluation des algorithmes CLES et CLEF.

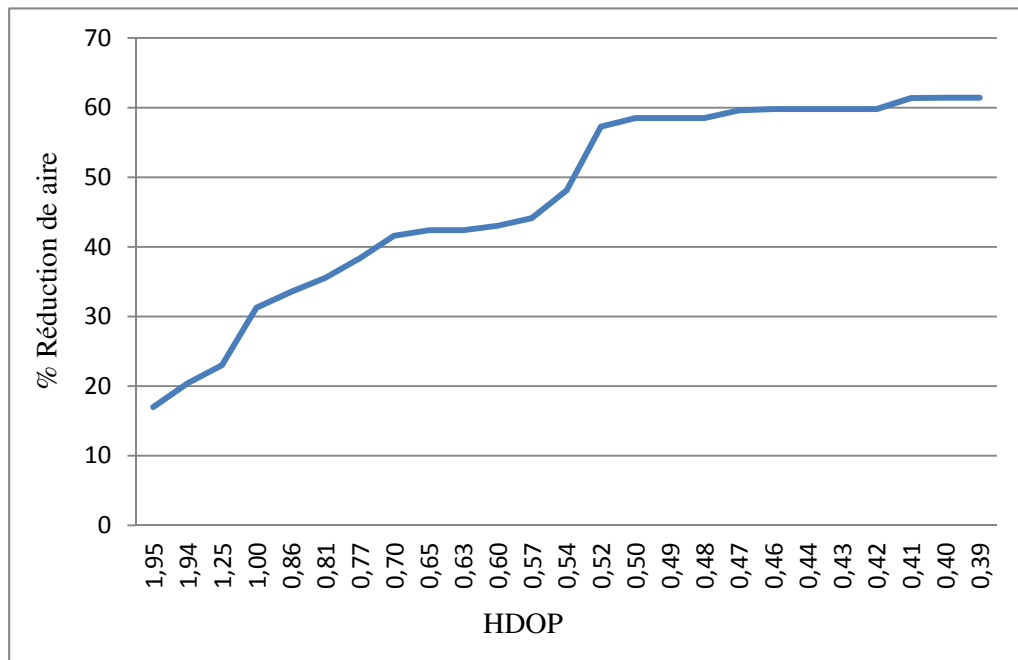


Figure 4.8 Impact de HDOP sur la réduction de l'aire du polygone de présence (incertitude de localisation).

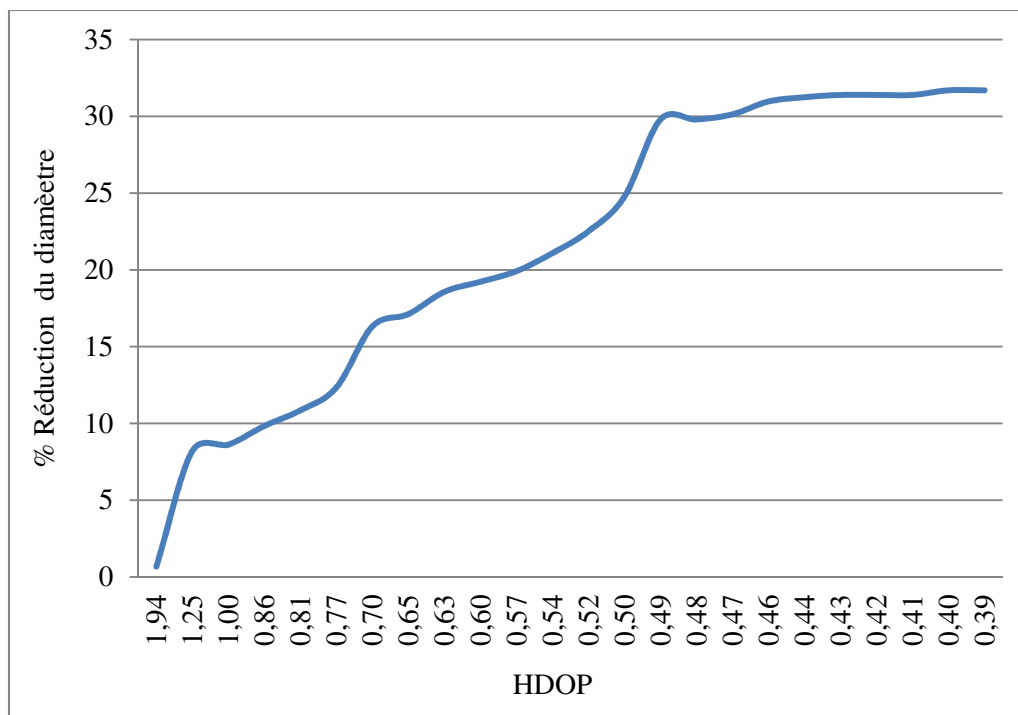


Figure 4.9 Impact de HDOP sur la réduction du diamètre de polygone.

Pour étudier l'algorithme CLES, on utilise le scénario de la figure 4.5, avec 25 polygones (tuiles carrées), avec polygone à réduire au centre. Les figures 4.9 et 4.10 représentent respectivement la réduction de l'aire et du diamètre du polygone de présence en fonction du paramètre HDOP qui représente l'affaiblissement ou la diminution horizontale de précision. Autrement dit, cela représente la diminution de l'incertitude en fonction de la configuration géométrique des polygones réducteurs (références ou balises) autour du polygone à réduire. Pour une bonne configuration géométrique, le HDOP est inférieur à 1, pour une mauvaise configuration, le HDOP est supérieur à 1. Notons que lors de l'application de l'algorithme CLES, les polygones réducteurs (tuiles carrées) dans la figure 4.5 sont parcourus de haut en bas et de droite à gauche, d'où l'amélioration de la configuration géométrique (diminution du HDOP) lorsqu'on s'approche du polygone 25, comme le montre la figure 4.10.

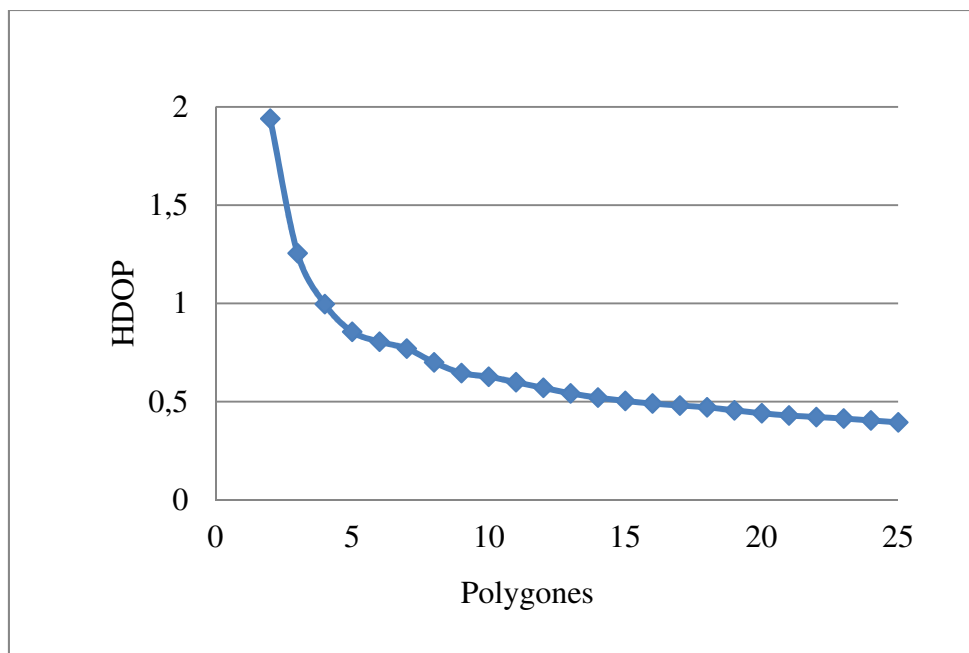


Figure 4.10 HDOP en fonction de la configuration géométrique

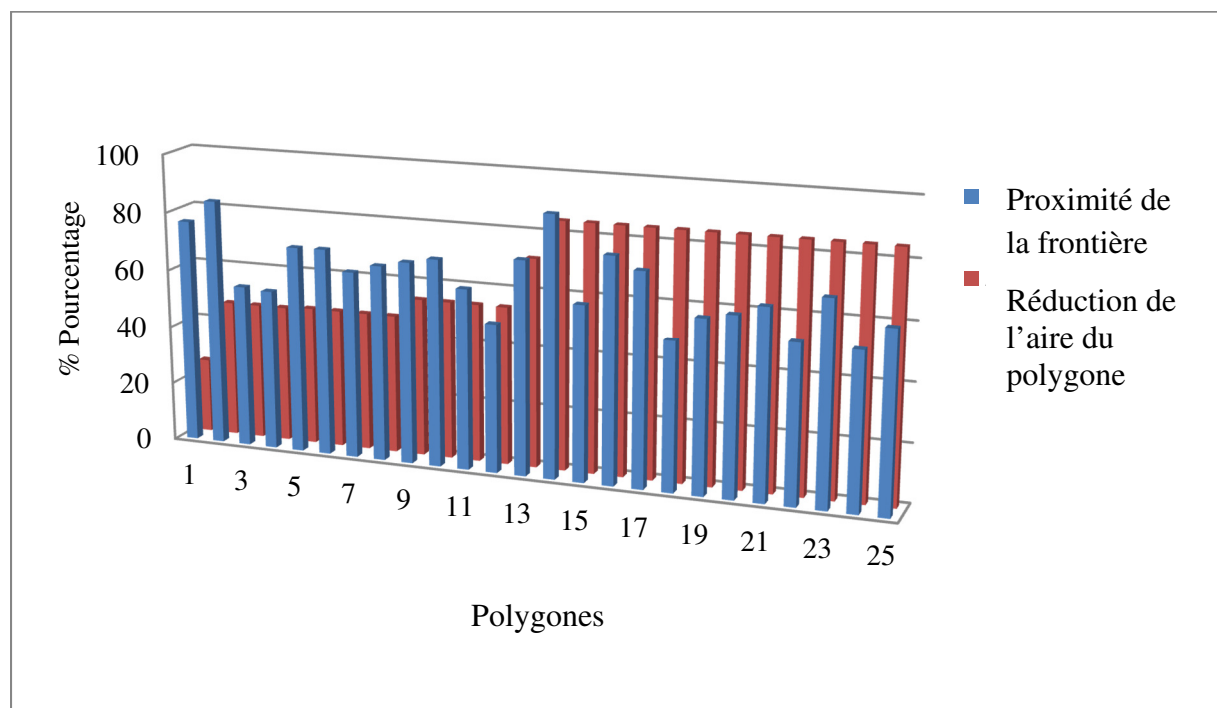


Figure 4.11 Influence de la proximité de la frontière.

Un autre paramètre important dans l'étude de la précision donnée par l'algorithme CLES consiste en la proximité des nœuds à localiser de la frontière des polygones de présence (polygones à réduire). On remarque que le pourcentage de réduction est important lorsque les nœuds sont plus

proches des frontières des polygones, comme on le voit dans la figure 4.11 (réduction pour les polygones de 1 à 2 et 11 à 13). Lorsqu'on s'éloigne des frontières, la réduction est moins importante (polygones de 3 à 11 et de 13 à 25). Afin de mettre en perspective les résultats précédents, dans le tableau 4.1, nous étudions la corrélation entre les paramètres en utilisant le coefficient de corrélation linéaire de Pearson défini par :

$$Cor(X, Y) = \frac{E[(X - E(X))(Y - E(Y))]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4.1)$$

Tableau 4.1 Corrélation entre les paramètres

	HDOP	Proximité de la frontière
Réduction de l'aire du polygone	-0,69	0,32
Diamètre maximal du polygone	-0,87	-0,01

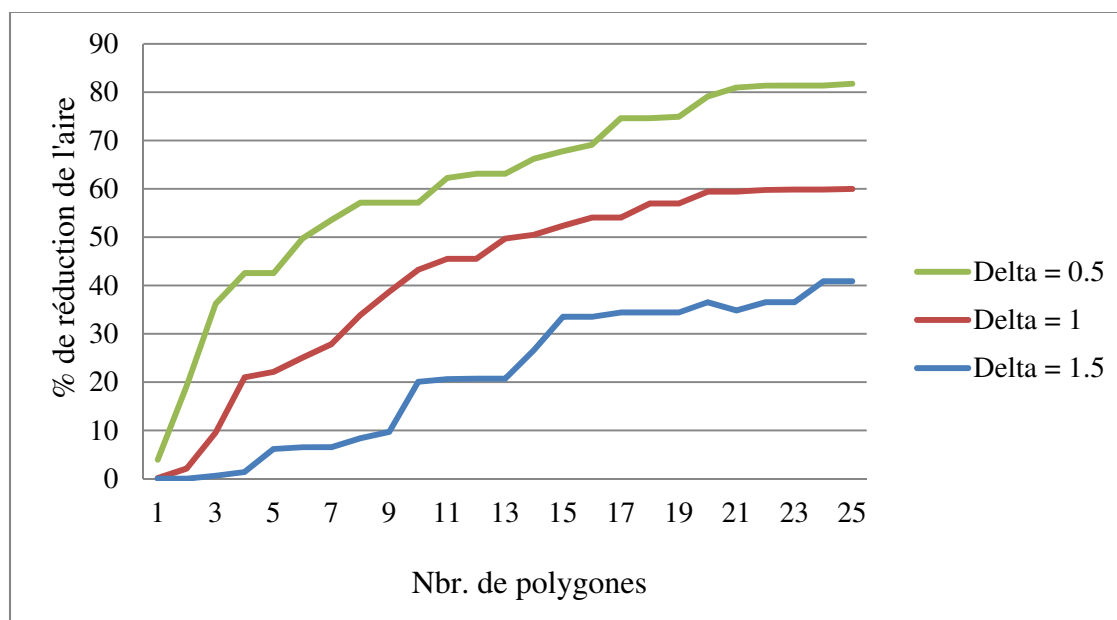


Figure 4.12 Impact du nombre de polygones sur la réduction de l'aire du polygone de présence pour différentes précisions de mesures des distances.

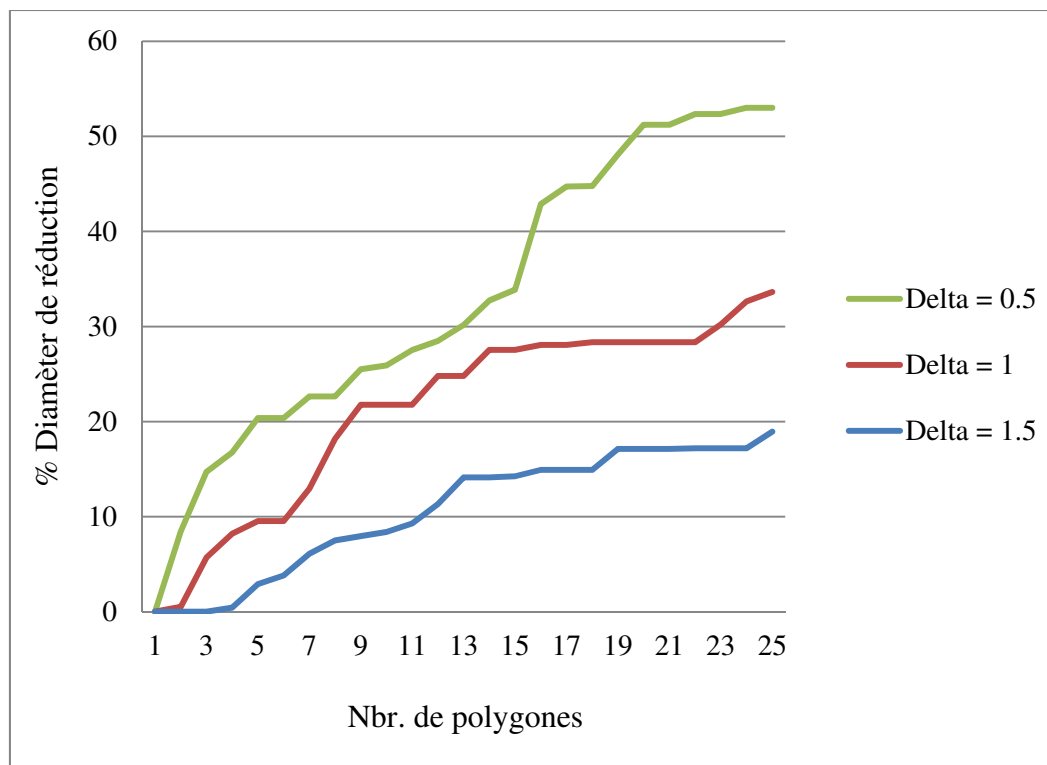


Figure 4.13 Impact du nombre de polygones sur la réduction du diamètre du polygone de présence pour différentes précisions de mesures de distances

Les figures 4.12 et 4.13 représentent respectivement la réduction de l'aire et du diamètre du polygone de présence en fonction du nombre de polygones pour différentes précisions de mesures de distances (Delta = 0.5, 1, 1.5m).

On remarque que la précision de localisation augmente avec l'amélioration de la précision de mesure de la distance et la bonne configuration géométrique. En particulier, pour une bonne précision de la mesure de distances internœuds (Delta = 0.5m) et une bonne configuration géométrique on peut atteindre une réduction de l'ordre de 82% de l'aire du polygone de présence et de 53% de son diamètre maximal.

Pour étudier l'algorithme CLEF, on utilise le scénario décrit dans la section 4.6.3, avec 22 nœuds choisis d'une façon aléatoire à l'intérieur des polygones qui représentent les signatures de signal, comme montré dans la figure 4.7. La figure 4.14 représente la fonction de répartition (CDF, Cumulative Distribution Function) qui donne l'erreur de positionnement de l'algorithme (CLEF)

pour un nombre de nœuds variables et une valeur de l'erreur de mesure de la distance constante (Delta=1) en comparaison avec l'approche standard de localisation par signatures.

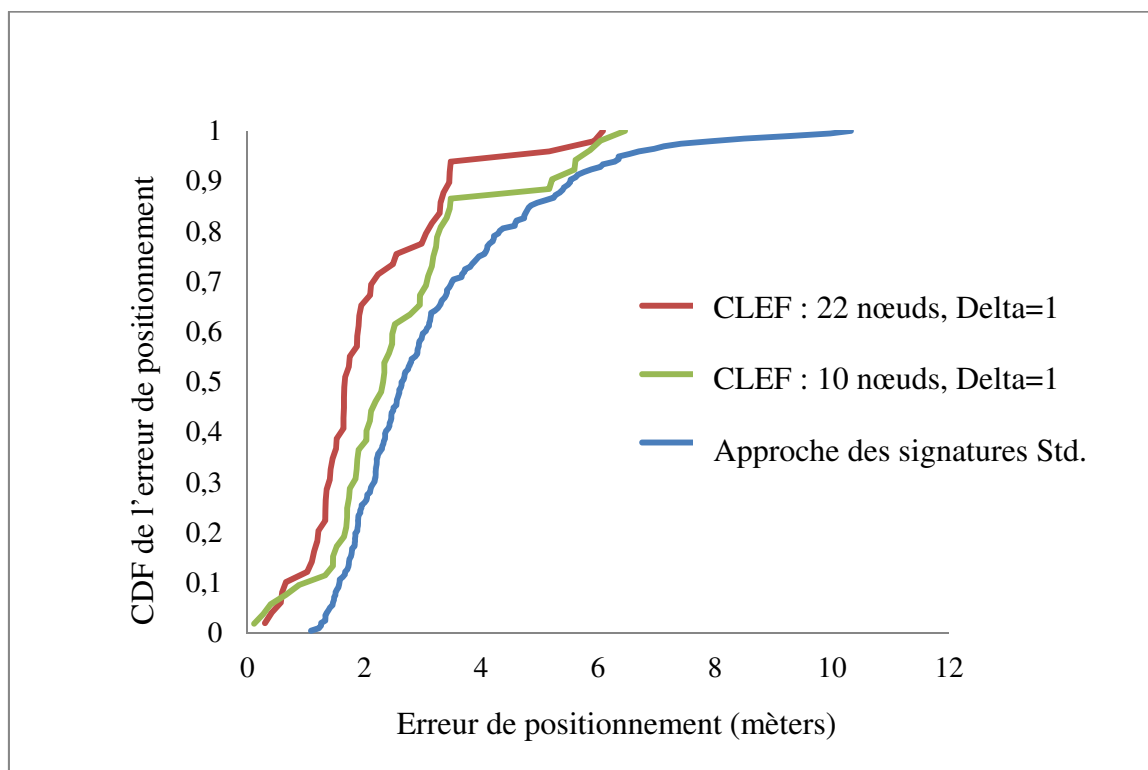


Figure 4.14 Fonction de répartition (CDF) de l'erreur de positionnement de l'algorithme CLEF pour un nombre de nœuds variable.

À partir des résultats représentés dans la figure 4.14, on remarque que dans 70% du temps, c'est-à-dire pour une valeur de la CDF de 70%, l'algorithme CLEF donne en moyenne une erreur de positionnement de 2.1 mètres (pour un nbr. de nœuds =22 et Delta =1), et de 3 mètres (pour un nbr. de nœuds =10 et Delta =1), contre 3.8 mètres pour l'approche des signatures standard.

Dans la figure 4.15, on représente la fonction de répartition (CDF) qui donne l'erreur de positionnement de l'algorithme CLEF pour une valeur de l'erreur de mesure de la distance variable, et un nombre de nœuds constant (nbr. de nœuds = 22), en comparaison avec l'approche de localisation par signatures standard.

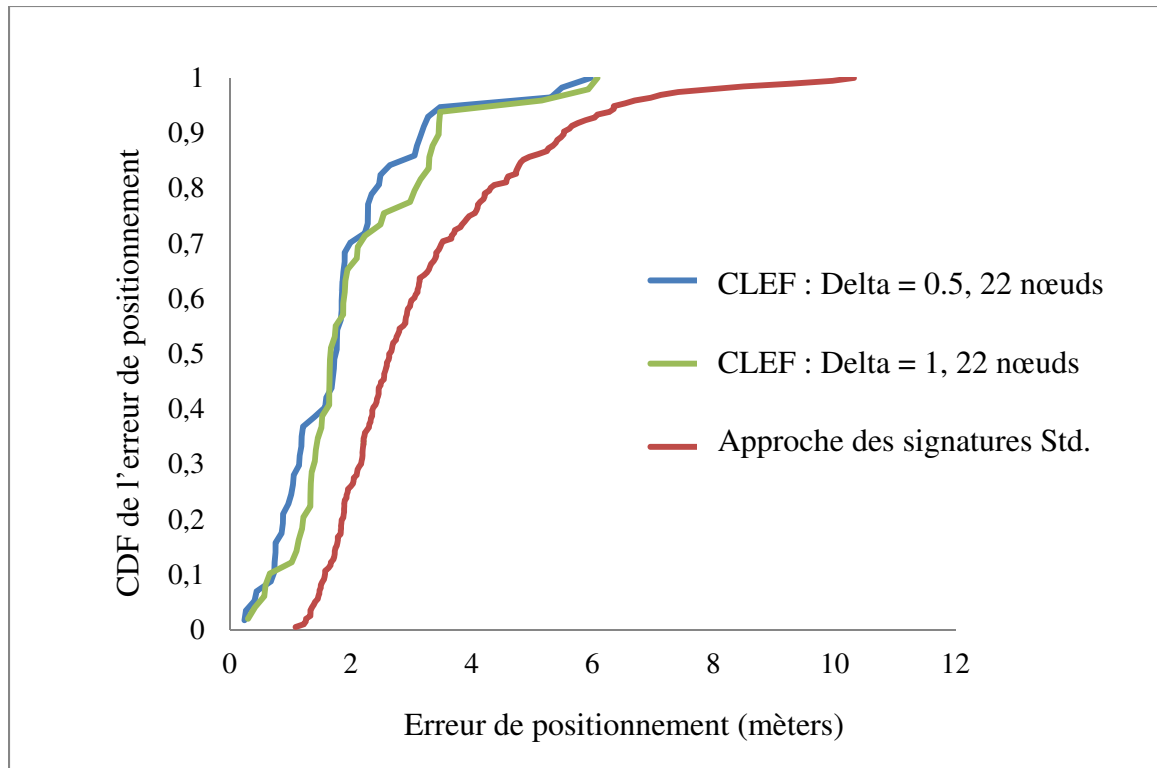


Figure 4.15 Fonction de répartition (CDF) de l'erreur de positionnement de l'algorithme CLEF pour différentes valeurs de l'erreur de mesure de la distance.

À partir des résultats représentés dans la figure 4.15, on remarque une nette différence entre les résultats de l'approche de localisation par signatures standard et les résultats de l'algorithme CLEF. En effet, l'algorithme CLEF permet d'avoir une erreur de positionnement bien inférieure à celle de l'approche de localisation par signatures standard. Par ailleurs, on note une légère amélioration de l'erreur moyenne de positionnement donnée par l'algorithme CLEF lorsque la valeur de Delta varie de 1 à 0.5.

Dans le tableau 4.20, on présente un récapitulatif des résultats de simulation de l'algorithme CLEF. On donne l'erreur moyenne et l'erreur médiane pour différentes valeurs de l'erreur de mesure de la distance (0.25, 0.5, 1), et pour un nombre de nœuds variable (22 nœuds, 10 nœuds). On remarque que pour une bonne précision sur la mesure de distance ( $\Delta = 0.25$ ) et un nombre de nœuds de 22, on a un pourcentage d'amélioration par rapport à la méthode standard de localisation par approche de signatures de signal (sans l'algorithme CLEF) de l'ordre de 46% en moyenne (41% en valeur médiane). Par ailleurs, lorsqu'on varie le nombre de nœuds de 10 à 22 avec une précision



sur la mesure de distance fixée à  $\Delta = 1$ , on a une amélioration de l'ordre du double : de 34% pour 22 nœuds et de 18.8% pour 10 nœuds (de 14.8% à 37% en valeur médiane).

Ces résultats prouvent la performance nettement supérieure des algorithmes proposés par rapport aux méthodes standards.

Tableau 4.2 Résultats de simulation de l'algorithme CLEF

		<b>Méthode CLEF, 22 nœuds, <math>\Delta=0.25</math></b>	<b>Méthode CLEF, 22 nœuds, <math>\Delta=0.5</math></b>	<b>Méthode CLEF, 22 nœuds, <math>\Delta=1</math></b>	<b>Méthode CLEF, 10 nœuds, <math>\Delta=1</math></b>	<b>Méthode ES standard</b>
<b>Erreur moyenne (mètre)</b>		1.7	1.8	2.1	2.6	3.2
<b>Erreur médiane (mètre)</b>		1.6	1.7	1.7	2.3	2.7
<b>Écart-type (mètre)</b>		0.7	1.1	1.2	1.5	3.4
<b>% Amélioration par rapport à la méthode ES</b>	<b>Moyenne</b>	46%	43%	34%	18.8%	-
	<b>Médiane</b>	41%	37%	37%	14.8%	-

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux nouveaux algorithmes de localisation coopérative basées sur une approche ensembliste. Le premier algorithme, appelé CLES (Cooperative Localization with Enhanced Set-membership), constitue un cadre applicatif pour la localisation coopérative basée sur l'approche ensembliste, qui permet d'améliorer la précision de localisation pour différentes approches (signatures de signal, GNSS, etc.). Ensuite, comme application de l'algorithme CLES à la localisation par approche des signatures de signal, nous avons proposé l'algorithme CLEF (Cooperative Localization with Enhanced Fingerprinting). Afin d'évaluer la performance des deux algorithmes (CLES et CLEF) au niveau de la précision, nous avons développé un simulateur et implémenté les deux algorithmes.

Pour l'algorithme CLES, on a montré que la précision de localisation augmente avec la précision de mesure de la distance, la bonne configuration géométrique, et la proximité des nœuds par rapport aux frontières du polygone (Set-membership). En particulier, pour une bonne précision de la mesure des distances internœuds ( $\Delta = 0.5\text{m}$ ) et une bonne configuration géométrique on peut

atteindre une réduction de l'ordre de 82% de l'aire du polygone de présence et de 53% de son diamètre maximal.

Pour l'algorithme CLEF, nous avons procédé à des mesures réelles pour les signatures de signal dans un environnement intérieur, puis nous avons utilisé notre simulateur pour évaluer statistiquement l'erreur de localisation donnée par notre algorithme. Pour ce faire, nous avons généré la fonction de répartition (CDF) de l'erreur de positionnement, puis déterminé l'erreur moyenne et l'erreur médiane pour différentes valeurs de la précision de mesure de la distance, et pour un nombre de nœuds variable. Nous avons montré que lorsqu'on varie le nombre moyen de nœuds de 10 à 22 avec une précision sur la mesure de distance fixe ( $\Delta = 1\text{m}$ ), on a une amélioration de l'ordre du double : de 34% pour 22 nœuds et de 18.8% pour 10 nœuds (de 14.8% à 37% en valeur médiane). Par ailleurs, pour une bonne précision sur la mesure de distance ( $\Delta = 0.25$ ) et un nombre moyen de nœuds de 22, on a un pourcentage d'amélioration par rapport à la méthode standard de localisation par approche de signatures de signal de l'ordre de 46% en moyenne (41% en valeur médiane). Ces résultats prouvent la performance nettement supérieure des algorithmes proposés par rapport aux méthodes standards.

Enfin, nous soulignons que les algorithmes CLES et CLEF pourraient très bien s'appliquer pour la localisation extérieure. De plus, avec le déploiement massif prévu des petites cellules (4G, 5G), les algorithmes proposés seraient très utiles pour la localisation précise et pour générer des cartes de signal d'une plus grande précision qui pourraient être exploitées pour l'amélioration de la gestion de relève et pour une sélection efficace des passerelles mobiles (traité au niveau du volet 2).

## CHAPITRE 5

### SÉLECTION DYNAMIQUE DES PASSERELLES POUR SUPPORT DE LA MOBILITÉ DANS LES PETITES CELLULES

L'architecture proposée dans cette thèse est constituée de deux parties : la première porte sur la communication VANET-infrastructure (au niveau véhiculaire), la deuxième porte sur la gestion de la mobilité dans les petites cellules (au niveau infrastructure). Le présent chapitre sera principalement consacré à la première partie, la deuxième partie sera étudiée de manière plus approfondie dans le chapitre suivant.

Pour ce faire, dans ce chapitre nous proposons un nouvel algorithme pour une sélection efficace des passerelles mobiles afin de relayer le trafic de véhicules voisins à la SC. Même si chaque véhicule peut utiliser directement son interface LTE-A pour les communications V2I, nous soutenons que l'agrégation du trafic des véhicules voisins vers un certain nombre de véhicules passerelles apportera de nombreux avantages pour la communication V2I, telle que la réduction de la charge de signalisation pour la gestion de relève, l'extension de la couverture des petites cellules en utilisant la communication V2V, la limite du nombre de mobiles connectés par SC, la réduction de la congestion V2V DSRC en déchargeant le trafic V2V tolérant au délai (*delay-tolerant traffic*), etc.

Par ailleurs, nous soulignons que l'utilisation de la solution hybride qui intègre la technologie LTE-A et DSRC (de 802.11p IEEE) ne nécessite pas des modifications aux spécifications LTE-A [7]. Ainsi, cette solution est moins complexe et plus abordable que d'autres options comme le déploiement à grande échelle de DSRC RSU, ou l'utilisation de la communication D2D. En outre, les protocoles VANET peuvent grandement bénéficier de la communication avec l'infrastructure [24] [11].

Le reste du chapitre est organisé comme suit. Dans la section suivante, nous présentons une revue de littérature, ensuite nous développons l'algorithme de sélection des passerelles mobiles. Une analyse du temps de calcul est offerte à la section 4.10, qui est suivie de la conclusion.

## 5.1 Revue de littérature

Benslimane et al. [1] proposent une architecture intégrée VANET-UMTS où les véhicules sont équipés par des interfaces IEEE 802.11p et 3G. Les véhicules sont regroupés dynamiquement en fonction de différents paramètres comme la puissance de signal reçu « *Received Signal Strength* » (RSS), la métrique « Link Expiration Time » (LET), et la métrique dérivée « Route Expiration Time » (RET). Ensuite, un nombre minimum de véhicules sont sélectionnés en tant que passerelles pour relier le VANET à l'UMTS. Les deux métriques LET et RET [16] ont été largement utilisées dans la littérature comme des critères qui mesurent la stabilité de la connectivité entre deux nœuds mobiles. LET est utilisée pour la stabilité du lien entre deux nœuds adjacents, tandis que le RET mesure est utilisée pour évaluer la durée de vie du lien multisauts. Bien que ces deux mesures sont simples pour la formation de grappes basées sur la vitesse relative et la portée sans fil, d'autres informations aussi importantes, telles que la charge au niveau de la passerelle et la limite de taille de la grappe, ne sont pas prises en considération, ce qui peut conduire à plus grande charge de signalisation pour la maintenance de la grappe.

Zhioua et al. [8] proposent un algorithme de sélection de passerelles sans fil utilisant la logique floue pour réseau hybride VANET-LTE-A. Outre les paramètres LET et RSS proposés dans [1], l'algorithme utilise des classes de QoS et la charge de la passerelle comme critères de sélection de la passerelle. Il est vrai que l'utilisation de critères supplémentaires pour la sélection de la passerelle peut donner de meilleurs résultats. Cependant, l'hypothèse que la décision de sélection de la passerelle est prise au niveau des véhicules sources est moins efficace. En effet, on génère plus de signalisation au niveau VANET pour la collecte de données et au niveau de la sélection de la passerelle, comme indiqué dans [11].

Remy et al. [11] comparent la performance de formation de grappes VANET en utilisant l'approche centralisée basée sur l'infrastructure LTE-A à l'approche décentralisée. L'approche centralisée profite de l'infrastructure en utilisant la technologie LTE-A pour réduire les coûts de signalisation au niveau de la gestion des grappes. En se basant sur les simulations, les auteurs montrent que l'approche centralisée a une meilleure performance par rapport à l'approche décentralisée pour la sélection des têtes de grappes (passerelles).

Dans [22], les auteurs proposent le « Mobile Gateway Routing Protocol » (MGRP) pour VANET. Il repose sur les interfaces IEEE 802.11p et 3G et le routage basé sur la localisation pour réduire

les coûts de routage. Pour la sélection des passerelles mobiles, MGRP utilise des véhicules avec trajectoire connue (ex. bus), un concept proposé auparavant dans [23]. Cependant, ces véhicules ne sont pas toujours disponibles à proximité et ils peuvent ne pas avoir la meilleure qualité de signal RSS.

Bien que la plupart des approches proposées puissent être considérées pour des réseaux hybrides VANET et réseau mobile à base de cellules macro, elles ne sont pas adaptées pour VANET intégré avec de petites cellules. En effet, vu la faible portée des petites cellules, d'autres facteurs tels que la couverture et le temps de séjour des véhicules doivent être pris en considération pour le choix de la meilleure passerelle mobile.

Par ailleurs, les principales approches proposées dans la littérature sont des approches distribuées basées sur l'utilisation des métriques LET et RAT. Dans [11] il a été démontré par simulation que l'approche centralisée est meilleure par rapport à l'approche distribuée (en termes de débit, taux de perte de paquets, charge de signalisation). Cependant, [11] n'a pas présenté de modélisation sous forme d'un problème d'optimisation.

Dans ce chapitre nous proposons une modélisation de la sélection des passerelles mobiles comme un problème de planification formulé sous forme de programmation linéaire binaire. Notre solution est centralisée au niveau des petites cellules, ce qui permet de profiter de l'infrastructure et des rapports de mesures.

## **5.2 Algorithme de sélection des passerelles mobiles**

### **5.2.1 Phase de collecte des données**

Dans l'architecture proposée, nous supposons que tous les véhicules soient équipés d'interfaces sans fil LTE-A / DSRC et de modules de localisation. Le module de localisation peut comprendre un système de navigation par satellite (*Global Navigation Satellite System, GNSS*) avec un système de navigation inertielle (*Inertial Navigation System, INS*), afin de déterminer avec précision la position du véhicule, la vitesse et les distances entre véhicules. Comme indiqué précédemment, un certain nombre de véhicules sont utilisés comme passerelles mobiles pour connecter les véhicules environnants avec le réseau LTE-A. Tels que définis par la spécification 3GPP LTE [20], chaque

UE (équipement utilisateur, à savoir le véhicule) envoie un rapport des mesures à la cellule de desserte (périodiquement ou sur événement). Dans le réseau LTE, deux types de paramètres de mesure sont utilisés pour la gestion de la relève et la resélection de cellule : RSRP « *Reference Signal Receive Power* » et RSRQ « *Reference Signal Receive Quality* ». RSRP fournit des informations sur l'intensité du signal. Plus précisément, il mesure la puissance moyenne des signaux LTE de référence au sein de la largeur de bande de fréquence considérée. Sa plage de mesure est définie entre -140 dBm à -44 dBm avec une résolution de 1 dBm. Les valeurs mesurées sont mappées à des nombres entiers de 0 à 97. Par ailleurs, le RSRQ est calculé en fonction du RSSI « *Received Signal Strength Indicator* » et du RSRP. Il est utilisé lorsque le paramètre RSRP ne suffit pas pour prendre une décision fiable de relève ou de resélection de cellule [20].

En outre, nous supposons que chaque véhicule envoie ses informations de localisation (id, position, vitesse, etc.) au nœud de l'infrastructure (SC, nœud d'ancrage-SC). Nous soulignons que, bien que l'information de localisation soit mise à jour périodiquement (de l'ordre de quelques secondes), la fréquence reste beaucoup moins élevée que les rapports de mesures (de l'ordre de millisecondes). Ainsi, la surcharge de signalisation reste limitée. D'autre part, en utilisant la localisation en corrélation avec les rapports de mesure de RSRP, la SC peut générer des statistiques sur la couverture, et prédire le débit moyen de l'UE et son temps de séjour qui seront utilisés dans la phase de sélection. Dans ce but, nous définissons un nouvel indicateur PA-RSRP (Predicted Average RSRP), qui calcule le RSRP moyen pendant une période  $T$  tout au long des zones  $p$ . Nous définissons l'indicateur PA-RSRP normalisé comme suite :

$$\delta_j = \frac{\sum_{p=1}^q \bar{t}_j^p \overline{RSRP}_j^p}{T \times RSRP_{max}} \quad (5.1)$$

où  $\bar{t}_j^p$  est le temps de séjour dans la zone  $p$ ,  $\overline{RSRP}_j^p$  est l'index *RSRP* dans la zone  $p$ , et  $RSRP_{max} = 97$ .

La figure 5.1 illustre un exemple de cartographie RSRP pour petite cellule LTE -A, calculée à partir de l'affaiblissement de signal (macroscopic fading appelé également path loss).

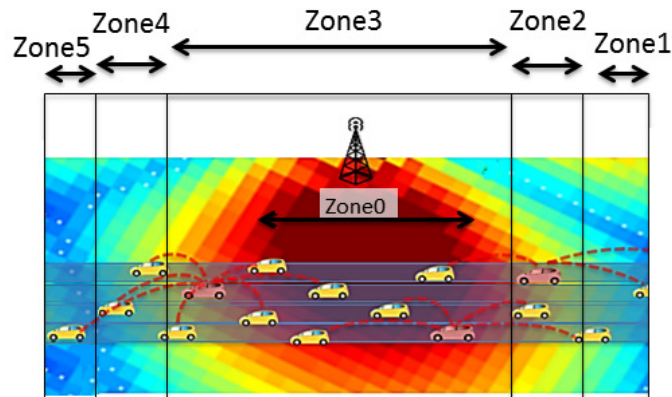


Figure 5.1 Schéma d'une carte de niveau RSRP basée sur l'évanouissement macroscopique  
*"Macroscopic fading"*

### 5.2.2 Phase de sélection

Comme détaillé dans le chapitre suivant, dans l'architecture proposée, le nœud d'ancrage local SC est responsable de la décision de relèvement. Étant donné qu'il dispose d'une vue générale de son domaine, il peut être également utilisé pour la sélection des passerelles (GWs). Bien que l'algorithme de sélection puisse être mis en œuvre au niveau des véhicules, il peut générer davantage de signalisation avec les communications V2V [11].

Le problème de sélection des passerelles est formulé sous forme de programmation linéaire binaire. La fonction d'utilité dépend de la qualité de la liaison entre les véhicules et la petite cellule, la distance entre deux véhicules  $i$  et  $j$  et le temps de séjour  $t_{ij}$  dans la portée de transmission des passerelles, qui est développée analytiquement en se basant sur la fonction de densité de probabilité (PDF) de la vitesse relative entre les véhicules.

Nous considérons un segment de route, qui pourrait être soit un segment de l'autoroute (par exemple, une autoroute urbaine) ou un segment entre deux intersections. Les véhicules peuvent avoir des conditions de trafic libre (*Free-flow traffic model*) ou trafic avec congestion.

a) Modèle de trafic libre (*free-flow traffic model*)

Dans l'hypothèse de trafic libre des véhicules, la distribution des vitesses par véhicule est approximativement gaussienne et sa fonction de densité de probabilité est donnée par [6]:

$$f_v(v) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-\bar{V})^2}{2\sigma_v^2}} \quad (5.2)$$

La fonction de densité de probabilité de la vitesse relative entre deux véhicules est donnée par:

$$f_{\Delta v}(\Delta v) = \frac{1}{\sigma_{\Delta v} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta v - \bar{\Delta V})^2}{2\sigma_{\Delta v}^2}} \quad (5.3)$$

où  $\Delta v = v_1 - v_2$ ,  $\bar{\Delta V} = \bar{V}_1 - \bar{V}_2$  et  $\sigma_{\Delta v}^2 = \sigma_{v_1}^2 + \sigma_{v_2}^2$ , sont respectivement la vitesse relative, la vitesse moyenne relative qui est définie comme la différence entre la vitesse moyenne du véhicule 1 et celle du véhicule 2, et la variance de la vitesse relative.

D'une façon équivalente, sous forme tronquée [9]:

$$f_{\Delta v}(\Delta v) = \frac{C_{\Delta}}{\sigma_{\Delta v} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta v - \bar{\Delta V})^2}{2\sigma_{\Delta v}^2}}, \Delta v \in [\Delta V_{min}; \Delta V_{max}] \quad (5.4)$$

où  $C_{\Delta}$  est la constante de normalisation résultante de la troncature, telle que:

$$C_{\Delta} = \frac{2}{\left( \operatorname{erf}\left(\frac{\Delta V_{max} - \bar{\Delta V}}{\sigma_{\Delta v} \sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\Delta V_{min} - \bar{\Delta V}}{\sigma_{\Delta v} \sqrt{2}}\right) \right)}$$

Alors que l'intervalle  $[\Delta V_{min}; \Delta V_{max}]$  est donné par :

$$[\Delta V_{min}; \Delta V_{max}] = [V_{j \min} - V_{MR \max}; V_{j \max} - V_{MR \min}]$$

où  $V_{j \min}$ ,  $V_{j \max}$ ,  $V_{MR \min}$ ,  $V_{MR \max}$ , sont la vitesse minimale et maximale pour les véhicules j et la passerelle, respectivement.

b) Modèle de trafic avec congestion (*Congestion traffic model*)

Avec ce modèle de congestion, la vitesse des véhicules est la même que celle du véhicule de tête (*leading vehicle*). Donc, nous avons les équations suivantes :  $v_i = v_j = tc$ . Par conséquent,  $\Delta v = v_i - v_j = 0$ , et le temps de résidence normalisé est  $t_{ij} = t_{max}$ .



Les véhicules gardent l'interdistance (l'écart) avec le véhicule de tête, où  $s(v) = s_0 + vT$ , avec  $s_0$  et  $T$  sont respectivement, l'écart minimum et l'écart de temps qui prennent généralement les valeurs  $s_0 = 2m$  et  $T = 1.6s$  [6].

### 5.2.3 Temps de séjour dans le champ de communication de la passerelle

Le temps de séjour d'un véhicule donné dans la zone de communication de la passerelle mobile est un paramètre important. En effet, si le temps de séjour du véhicule est inférieur à un seuil donné, la relève peut donner lieu à un gaspillage inutile des ressources du réseau. Dans 3GPP, le temps nominal minimum de séjour "*Minimum Time of Stay, (MTS)*" est de 1s [18].

Puisque nous sommes également intéressés par le temps de séjour dans la portée de transmission des véhicules passerelles (deux véhicules en mouvement), dans ce qui suit, nous étendrons la formule donnée dans [9], qui calcule le temps de séjour des véhicules dans la portée d'un point d'accès fixe RSU. Considérant  $t_{ij} = \frac{R}{\Delta v}$  le temps de séjour du véhicule  $i$  dans la portée de transmission du véhicule  $j$ , où  $\Delta v$  est la vitesse relative, et  $R$  est la portée de transmission (supposée être égale pour tous les véhicules). Rappelons l'équation (5.3) avec changement de variable  $\Delta v = \frac{R}{t_{ij}}$ . La fonction de densité de probabilité tronquée est donnée par :

$$f_{t_{ij}}(t) = \frac{C_{\Delta} \cdot R}{t^2 \sigma_{\Delta v} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\frac{R}{t} - \Delta V)^2}{2\sigma_{\Delta v}^2}}, \quad t \in [t_{min}; t_{max}] \quad (5.5)$$

où:  $t_{min} = \frac{R}{\Delta V_{max}}$  et  $t_{max} = \frac{R}{\Delta V_{min}}$  sont respectivement le temps de résidence minimum et maximum du véhicule dans la portée de communication  $R$  de la passerelle. Ensuite, la valeur moyenne est donnée par :

$$\overline{t_{ij}} = \int t \cdot f_{t_{ij}}(t) dt, \quad t \in [t_{min}; t_{max}] \quad (5.6)$$

En se basant sur l'équation (5.5), on évalue l'impact de la vitesse relative et de la portée de communication sur le temps de résidence.

Vitesse relative  $\Delta V = 10 \text{ km/h}$

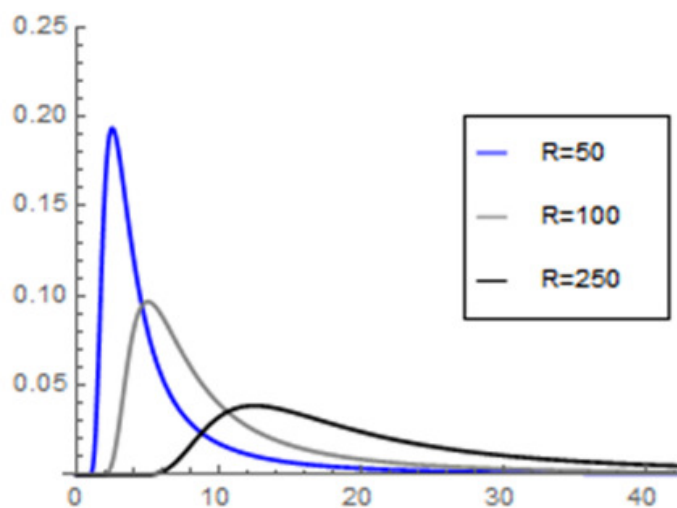


Figure 5.2 Temps de résidence pour différentes portées

Portée de communication  $R = 250 \text{ m}$

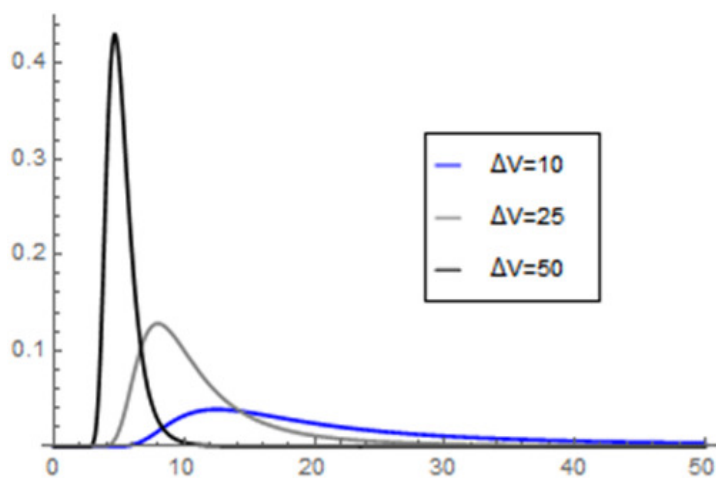


Figure 5.3 Temps de résidence pour différents niveaux de vitesses relatives.

### 5.2.4 Formulation de l'algorithme de sélection des passerelles LTE-A

Dans cette sous-section, nous formulons le problème de sélection des passerelles mobiles sous forme de modèle de programmation linéaire binaire. La fonction d'utilité est exprimée sous forme d'une fonction multi-objective dont le premier terme vise à sélectionner les véhicules qui sont à une distance minimale de la passerelle, alors que le deuxième terme vise à sélectionner les passerelles qui ont le meilleur niveau de signal avec un temps de séjour moyen maximum. La fonction d'utilité est sujette à un certain nombre de contraintes, qui sont décrites plus en détail ci-dessous. Sans perte de généralité, nous considérons le cas d'une seule SC. Toutefois, la formulation proposée peut être facilement étendue à plusieurs SC.

#### Variables de décision :

Tout d'abord, nous définissons les variables binaires de décision  $x_{ij}, y_j$  telles que  $y_j = 1$  indique la sélection de la passerelle  $j$  et  $x_{ij} = 1$  indique l'affectation du véhicule  $i$  à la passerelle  $j$ .

#### Constantes :

Nous définissons également les constantes suivantes qui sont fournies en entrée pour notre modèle (supposées constantes durant la période de  $m$ -à- $j$ ).

$\delta_j$  est l'indicateur PA-RSRP normalisé défini par l'équation (5.1).

$d_{ij}$  est l'inter-distance normalisée entre le véhicule  $i$  et  $j$ .

$\alpha$  et  $\beta$  sont les facteurs de pondération de la formulation multiobjective, avec  $\alpha + \beta = 1$ .

$t_{ij}$  est le temps de séjour prévu du véhicule  $i$  dans la portée de transmission de  $j$  (donnée par l'équation (5.6)).

$s_i$  est le débit de données demandé du nœud  $i$ .

$C_j^{DSRC}$  est la capacité de l'interface DSRC de la passerelle  $j$ . tandis que  $C^{LTE}$  est la capacité de la SC.

$K$  est le nombre maximum de passerelles par SC (c-à-d grappes par SC).

$N$  est le nombre de véhicules par SC.

$d^{th}$  est la distance maximale à 1 saut à partir de la passerelle mobile.

$t^{th}$  est le temps de séjour minimal du véhicule dans la portée de transmission de la passerelle.

$\theta^{th}$  et  $dir_{ij}$  sont respectivement, le seuil de l'angle et la direction relative entre les vecteurs de vitesse des véhicules  $i$  et  $j$ . Si les véhicules  $i$  et  $j$  se déplacent dans le sens inverse, le véhicule  $i$  n'est pas affecté à la passerelle  $j$ .

### Fonction d'utilité et contraintes :

L'objectif est de trouver les valeurs des variables binaires  $x_{ij}$ ,  $y_j$  qui minimisent la fonction d'utilité suivante:

$$f = \alpha \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N d_{ij} x_{ij} - \beta \sum_{j=1}^N \delta_j y_j \quad (5.7)$$

Sujet aux contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^N s_i x_{ij} \leq C_j^{DSRC} \quad (5.8)$$

$$\sum_{j=1}^N C_j^{DSRC} y_j \leq C^{LTE} \quad (5.9)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \quad (5.10)$$

$$\sum_{j=1}^N y_j \leq K \quad (5.11)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad (5.12)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \text{si } \overline{t_{ij}} \leq t^{th} \quad (5.13)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \text{si } dir_{ij} \leq \theta^{th} \quad (5.14)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \text{si } d_{ij} \geq d^{th} \quad (5.15)$$

$$x_{ij}, y_j, \in \{0, 1\} \quad (5.16)$$

La fonction d'utilité dans (5.7) est exprimée comme une fonction multiobjective avec des facteurs de pondération  $\alpha$  et  $\beta$ . Le premier terme est utilisé pour sélectionner les véhicules qui sont à une distance  $d_{ij}$  minimale de la passerelle  $j$ , alors que le deuxième terme est utilisé pour sélectionner les passerelles  $j$  qui ont le meilleur niveau de signal (c.-à-d., PA-RSRP maximal) avec un temps de séjour moyen maximum.

L'ensemble des contraintes sont: (5.8) et (5.9) sont utilisés pour veiller à ce que le débit de données demandé ne dépasse pas la capacité de la passerelle, et la capacité de la SC, respectivement. (5.10) est utilisé pour s'assurer que chaque véhicule est connecté à une seule passerelle. (5.11) est utilisé pour limiter le nombre de passerelles par SC. (5.12) est utilisé pour interdire le lien (communication à 1-saut) si le véhicule  $j$  n'est pas une passerelle. (5.13) est utilisé pour interdire le lien si le temps de séjour moyen est inférieur à un seuil déterminé. (5.14) le lien n'est pas autorisé si des véhicules se déplacent dans des directions opposées. (5.15) est utilisé pour limiter la portée autorisée entre le véhicule  $i$  et la passerelle  $j$ . Enfin (5.16) sont les contraintes d'intégralité.

### 5.3 Analyse du temps de calcul

Étant donné que notre schéma de sélection des passerelles mobiles est un problème de planification, notre objectif principal est de voir si notre problème, connu pour être NP-complet [100], peut être résolu dans un temps acceptable pour notre application avec un nombre réaliste de véhicules par petites cellules (30-50). Pour ce faire, la formulation proposée est implémentée en utilisant l'API GUROBI (general linear programming solver) [4] et exécutée sur PC avec processeur Core i7 de 8 Go de RAM. Le temps de traitement est illustré à la figure 5.5.

Bien que le problème soit connu pour être NP-complet, nous remarquons que pour un nombre réaliste de véhicules par petites cellules (30-50), le temps d'exécution est relativement court (20-30ms), ce qui reste adéquat pour notre application. En outre, nous remarquons que le coût au niveau du temps de calcul augmente en fonction du degré moyen de passerelles qui est une fonction de la densité  $\rho$  et de la portée  $R$ , donné par  $\rho\pi R^2$ . Le résultat est logique puisque quand le degré moyen de passerelle augmente, plus de solutions réalisables peuvent être trouvées.

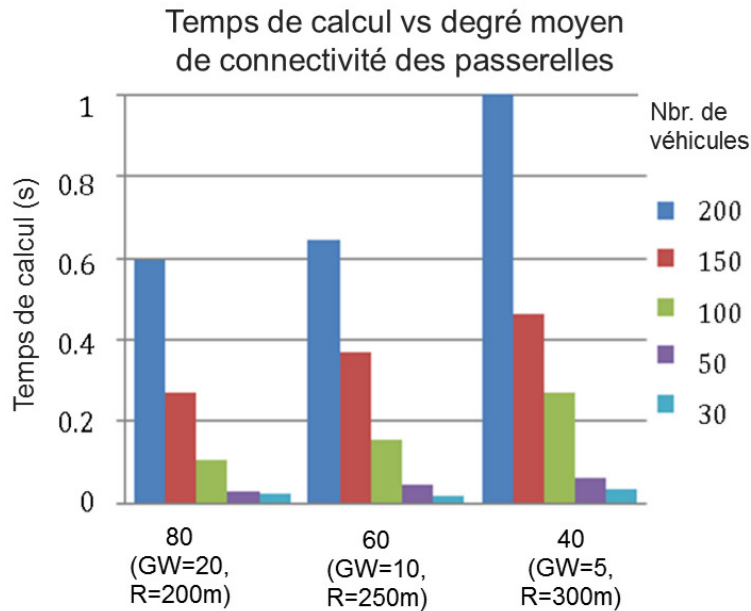


Figure 5.4 Temps de calcul pour l'algorithme de sélection en fonction du nombre de véhicules et du degré de connectivité

## 5.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un nouvel algorithme pour une sélection efficace des passerelles mobiles dans une architecture intégrée VANET-LTE-A. Cet algorithme permet de relayer le trafic des véhicules voisins vers les petites cellules LTE-A en utilisant la communication DSRC/WAVE. L'agrégation du trafic des véhicules voisins vers un nombre limité de véhicules passerelles permet plusieurs avantages pour la communication V2I, tels que la réduction de la charge de signalisation pour la gestion de relève, l'extension de la couverture des petites cellules en utilisant la communication V2V, la réduction du nombre d'UE connectées par petite cellule. Pour ce faire, nous avons formulé le problème de sélection des passerelles mobiles comme un problème de programmation linéaire binaire multiobjectif (MO-BIP). Ensuite, afin d'analyser le temps de calcul, nous avons implémenté notre modèle en utilisant un outil de programmation linéaire, et nous avons montré que pour différents degrés de connectivité et un nombre de véhicules par petite cellule réaliste (30 à 50 véhicules) le temps d'exécution est relativement court (inférieur à la seconde).

Dans le chapitre suivant, nous allons également étudier l'impact de cet algorithme sur la diminution de la charge de signalisation au niveau de la gestion de relève. Notons finalement, que l'algorithme proposé pourrait également s'appliquer dans un contexte non véhiculaire, où des usagers (piétons avec téléphone mobile) coopèrent dans un réseau ad hoc ou de type LTE-A D2D (Device to Device) en sélectionnant des passerelles pour relayer le trafic vers les petites cellules du réseau LTE-A.

## **CHAPITRE 6**

### **ARCHITECTURE INTÉGRÉE VANET-LTE-A POUR LA GESTION DE MOBILITÉ DANS LES PETITES CELLULES**

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux défis relatifs à la gestion de la mobilité dans les petites cellules LTE-A afin de supporter efficacement les communications des véhicules connectés. Bien que l'utilisation des petites cellules (SC) LTE-A soit une solution intéressante pour les communications V2I, un certain nombre de problèmes relatifs à la gestion de la mobilité, et plus particulièrement à la gestion de relève doivent être résolus. En effet, l'utilisation de SC avec une couverture limitée provoque des relèves fréquentes qui mènent à une surcharge élevée de signalisation vers le réseau cœur. Afin de résoudre ce problème, nous proposons dans ce chapitre un nouveau schéma basé sur les nœuds d'ancrage et le transfert local de trafic en utilisant les liens X2. Trois procédures sont proposées, à savoir: 1) intradomaine, 2) interdomaines, 3) et K-sauts interdomaines. Ces procédures permettent d'assurer la continuité du service aux véhicules circulants à l'intérieur ou à l'extérieur des domaines des nœuds d'ancrage, tout en minimisant la charge de signalisation vers le réseau cœur.

#### **6.1 Introduction**

Devant la prolifération des appareils et des applications mobiles, la demande en données mobiles continue de croître de façon exponentielle. Bien que les macro-cellules restent les principaux éléments du réseau d'accès capables d'offrir une couverture étendue et de supporter des utilisateurs à grande vitesse, elles ne sont plus suffisantes pour répondre à la forte demande des utilisateurs dans les régions à grande densité. Aujourd'hui, les SCs sont largement reconnues et adoptées par les opérateurs de réseaux mobiles comme une solution clé pour améliorer l'efficacité spectrale par zone de couverture et décharger le trafic (traffic offloading) au niveau des macro-cellules.

Traditionnellement, les petites cellules sont déployées à l'intérieur ou à l'extérieur pour une utilisation dans les maisons, les entreprises et les espaces publics. Afin d'avoir une meilleure réutilisation des ressources et d'assurer une meilleure couverture du réseau cellulaire, les petites cellules peuvent être utilisées de manière partagée entre les mobiles à l'intérieur et à l'extérieur des



espaces publics [64]. Ainsi, l'opérateur mobile peut utiliser les ressources des petites cellules dans le voisinage d'une autoroute urbaine pour servir les véhicules dans leur déplacement et décharger les macrocellules pendant les heures de pointe. Cette situation est caractérisée par une forte demande en bande passante avec une vitesse relativement faible pendant les heures de pointe. Cela nécessite une meilleure coordination entre les cellules, pour une gestion efficace de la mobilité et des interférences qui peut être mise-en-œuvre via les fonctions de réseau auto-organisé SON (Self Organizing Network) [64].

Dans un réseau cellulaire, la gestion de la mobilité constitue une fonction essentielle pour suivre et aider les clients mobiles à compléter la relève d'une façon transparente avec la meilleure connexion possible. Cependant, étant donné la portée limitée des petites cellules, cela provoque des relèves fréquentes qui mènent à une surcharge élevée de signalisation vers le réseau cœur.

Dans ce chapitre, comme deuxième élément de l'architecture VANET-LTE-A, nous proposons un schéma de mobilité (*anchor mobility scheme-AMS*) pour petites cellules qui vise à réduire le trafic de signalisation en introduisant des unités logiques d'ancrage. Pour ce faire, les petites cellules sont divisées en plusieurs grappes où chaque grappe contient une petite cellule choisie comme nœud d'ancrage local. Par ailleurs, au niveau des véhicules, nous utiliserons les passerelles mobiles avec *grappes mobiles* telles que proposées au chapitre précédent.

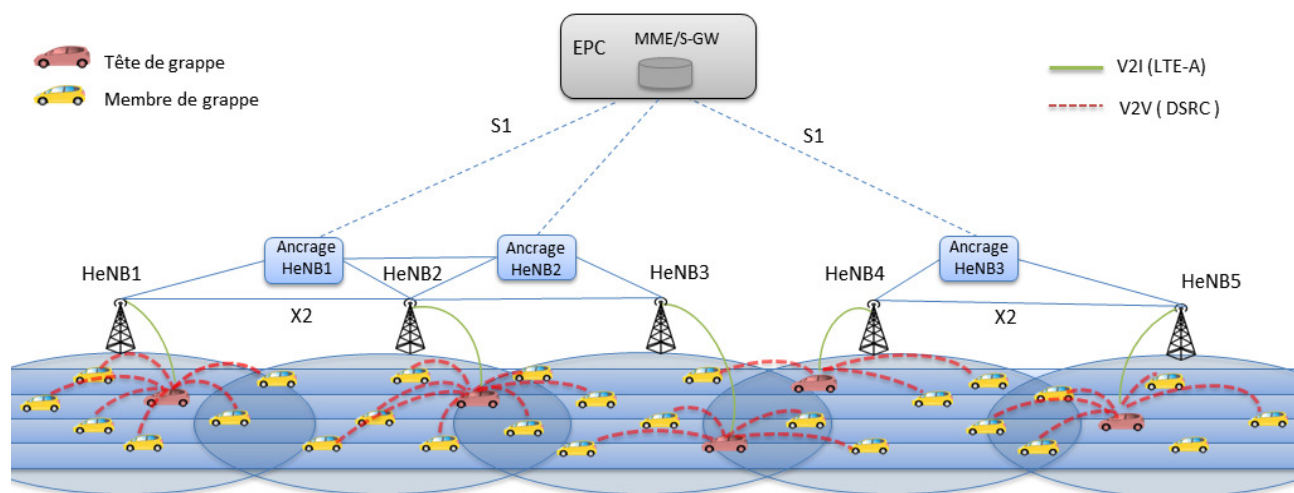


Figure 6.1 Architecture VANET-LTE-A proposée

## 6.2 Revue de littérature

Guo et al. [10] proposent une gestion de la mobilité locale utilisant le transfert du trafic basé sur le lien X2. Au lieu de commuter le chemin de données après chaque relève, une chaîne de transmission du trafic basée sur le lien X2 est établie entre le HeNB courant et le premier HeNB considéré comme nœud d'ancrage local. Un compromis entre le coût de commutation de chemin et le transfert du trafic est recherché, en se basant sur un seuil défini par la longueur de la chaîne de transmission. Le premier schéma proposé ajoute en cascade le HeNB cible au HeNB source précédent après chaque HO, tout au long du chemin X2 local. Un second schéma améliore le précédent par l'exécution de la commutation locale de chemin lorsque le HeNB cible a un chemin plus court à partir du point d'ancrage d'origine que le chemin en cascade. La simulation montre que les schémas proposés peuvent réduire considérablement le coût de signalisation du réseau par rapport à la norme 3GPP. Les systèmes proposés sont basés sur la transmission du pointeur qui a été d'abord introduit dans [12] pour réduire la signalisation de réseau et de base de données pour la gestion de localisation dans les réseaux cellulaires. L'inconvénient de cette approche est que le choix du premier nœud d'ancrage est arbitraire (non optimal). En plus, l'établissement d'une chaîne de transmission en cascade génère localement une surcharge de signalisation.

Balakrishnan et Akyildiz [27] proposent un schéma de relève pour les petites cellules LTE, basé sur les nœuds d'ancrage local. Contrairement à [10], les auteurs supposent que les nœuds d'ancrage sont présélectionnés selon un critère d'optimalité (ex. arbre couvrant de poids minimal). De la même manière que [10], les auteurs utilisent un modèle de Markov pour étudier le coût de relève et le temps d'interruption pour le schéma proposé. Les résultats numériques présentés montrent une réduction de 50 % dans les coûts de transfert et de 80 % de réduction des temps d'interruption. L'inconvénient de cette approche est que le nœud d'ancrage qui est aussi une petite cellule HeNB avec des ressources limitées (capacité de calcul, bande passante) ne peut supporter qu'un nombre limité de HeNBs dans son domaine. En conséquence, lorsque le mobile est traversé le domaine d'ancrage, la commutation de chemin de liaison descendante est exécutée une nouvelle fois au niveau du réseau central (MME/S-GW), ce qui génère une surcharge de signalisation. Le problème devient relativement critique lorsque le taux de franchissement de la frontière des domaines d'ancrage est plus grand en raison de la petite taille du domaine d'ancrage ou de l'augmentation de la vitesse des mobiles.

Dans [13], un nœud intermédiaire appelé passerelle HeNB (HeNB-GW) est proposé pour résoudre la mise à l'échelle et la sécurité du déploiement de femtocellules en permettant l'agrégation ou la concentration pour un groupe de points d'accès femtocellule. Dans le schéma de gestion de la mobilité proposé, le HeNB-GW agit comme nœud d'ancrage de mobilité. Cependant, étant donné le fait que le HeNB-GW est toujours situé sur la prémisses de l'opérateur mobile, des coûts de signalisation inutiles atteignent toujours le réseau cœur.

Dans ce chapitre nous proposons un schéma de mobilité basée sur les nœuds d'ancrage local avec un transfert de  $k$ -sauts entre les nœuds d'ancrage, en plus des passerelles mobiles GWs qui permettent l'agrégation du trafic des véhicules pour réduire la signalisation vers le CN, comme présenté à la figure 6-1.

### **6.2.1 Problématique**

Comme mentionné précédemment, dans notre architecture, les petites cellules LTE-A SC sont utilisées pour connecter le réseau VANET au réseau LTE-A, comme présentée dans la figure 6-1. Néanmoins, le schéma de mobilité considéré dans 3GPP-Rel12 [7] et dont la procédure de relève est présentée dans la figure. 6.2, présente des inconvénients tels que la charge élevée de signalisation en raison de la sollicitation fréquente du réseau cœur à chaque fois qu'un utilisateur mobile change son point d'attachement. Cette situation devient relativement critique lors de l'utilisation de petites cellules ou lorsque la vitesse augmente [2].

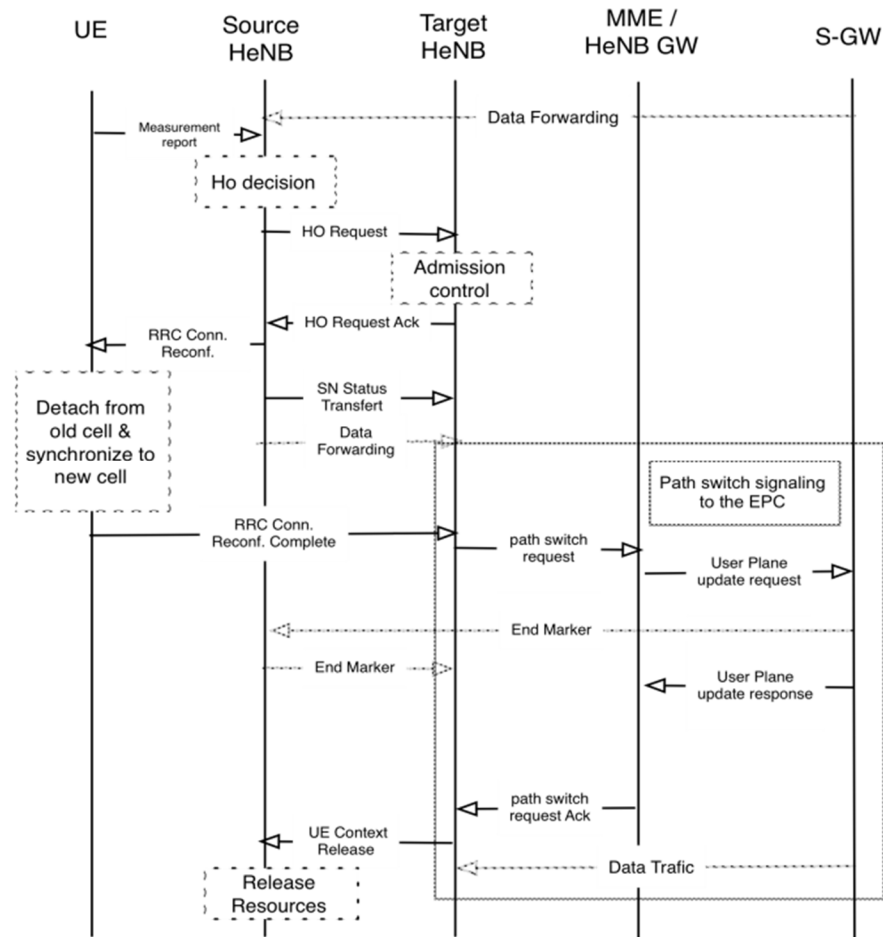


Figure 6.2 Procédure de gestion de relève 3GPP HeNB [7].

En conséquence, nous proposons un schéma de mobilité basé sur les nœuds d'ancrage pour permettre aux véhicules de se déplacer, par exemple à l'intérieur d'une autoroute urbaine, avec un minimum de charge de signalisation par rapport à la procédure de mobilité de 3GPP LTE-A illustrée à la figure 6.2. Nous rappelons que le détail de cette procédure est expliqué au niveau du chapitre 2. Plus précisément, nous visons à profiter de l'infrastructure existante en termes de petites cellules HeNB au voisinage des routes ou d'une autoroute urbaine pour gérer localement un certain nombre de relèves. Pour ce faire, nous considérons l'architecture représentée dans la figure 6.1, où une composante logique, appelée nœud d'ancrage local, conserve une vue d'ensemble des HeNBs et des utilisateurs mobiles appartenant à son domaine de service. En effet, chaque nœud d'ancrage sert un nombre d'HeNBs situés dans son voisinage et forme ce que nous considérons comme un domaine d'ancrage logique. Par conséquent, le schéma AMS proposé a l'avantage de cette vue

pour compléter un maximum de relève localement. Dans ce qui suit, nous donnons plus de détails concernant le schéma AMS proposé pour réaliser les relèves k-saut inter-domaine, intra-domaine ou inter-domaine.

### 6.2.2 Procédure de mobilité intra-domaine

Sur la base de l'architecture illustrée dans la figure 1, nous nous concentrons sur la mobilité de véhicules à l'intérieur d'un domaine d'ancrage. En pratique, le nœud d'ancrage HeNB peut être responsable de plus de deux HeNBs. Ainsi, lorsqu'un véhicule se déplace à l'intérieur du même domaine d'ancrage virtuel, il traverse plusieurs HeNB. En conséquence, il doit faire plusieurs relèves. Le schéma de mobilité intra-domaine proposé réduira les sollicitations inutiles de l'EPC comme il est indiqué dans la procédure présentée dans la figure. 6.3.

Plus précisément, la procédure de mobilité, dans ce cas, est décrite comme suit:

- Périodiquement, le véhicule mobile envoie un rapport de mesure à l'HeNB source qui vérifie si les seuils prédéfinis sont satisfaits. Si tel est le cas, une demande de relève (*HO Request*) est envoyée au nœud d'ancrage local.
- Sur la base de son module de décision HO, le nœud d'ancrage local sélectionne l'HeNB cible appropriée en envoyant une requête de notification HO (*HO Request notification*).
- Ensuite, l'HeNB cible effectue le contrôle d'admission pour le véhicule mobile, et répond avec un message d'acquiescement de requête (*HO Request Ack*) au nœud d'ancrage source.
- Si le contrôle d'admission échoue, alors le nœud d'ancrage local sélectionne une nouvelle HeNB cible.
- Après, le nœud d'ancrage local transmet la requête d'ACK HO à l'HeNB source et commence à dupliquer les données vers l'HeNB cible.
- Lorsque l'HeNB source reçoit la réponse HO (*Handover response*), il émet la commande de HO (*Handover Command*) au véhicule mobile, qui se détache alors de l'HeNB associé et effectue le transfert au nouveau HeNB.
- Après avoir terminé la synchronisation, l'HeNB cible commence à envoyer des données vers le véhicule avec une requête de commutation de chemin (*Local Path Switch Request*) à son nœud d'ancrage local.

- Enfin, l'HeNB cible envoie un message (*Context release message*) à l'HeNB source pour libérer les ressources.

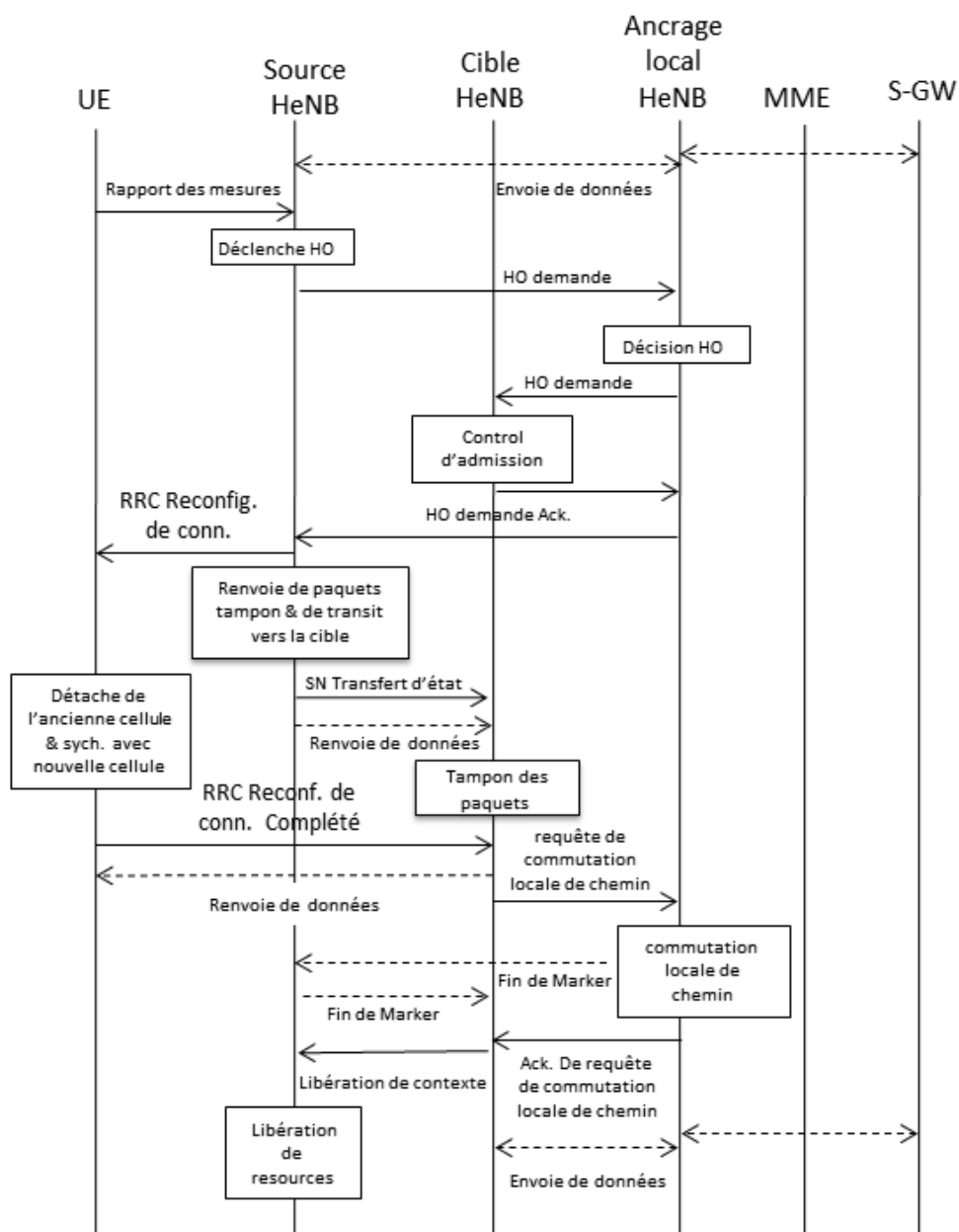


Figure 6.3 Procédure de mobilité d'ancrage intra-domaine: type (a)

Sur la base de la description ci-dessus (illustrée à la figure 6.3), nous remarquons que lorsque la relève est effectuée à l'intérieur du même domaine d'ancrage, le transfert du trafic est accompli localement par le nœud d'ancrage et l'interface X2. En outre, la charge de signalisation liée au changement de chemin de/vers le réseau cœur EPC est limitée, car la procédure

d'attachement/détachement reste transparente pour les composants MME/S-GW. Par conséquent, il est prévu que la procédure de relève améliorée contribuera à réduire la charge globale de signalisation comme il sera discuté plus loin.

### 6.2.3 Procédure de mobilité k-sauts inter-domaine

La procédure de relève est déclenchée lorsque le rapport de mesure indique une détérioration de la puissance / qualité de signal de la cellule courante. En conséquence, une demande de relève (*HO Request*) est envoyée au nœud d'ancrage local qui effectue la décision de relève. Si l'HeNB cible n'est pas servi par le nœud d'ancrage local actuel et le nombre de transferts entre les nœuds d'ancrage successifs ne dépasse pas un nombre de k-sauts prédéfinis, une demande de relève est immédiatement envoyée au nœud d'ancrage local cible. La demande de relève est ensuite transmise à l'HeNB cible qui effectue le contrôle d'admission. Ensuite, un message d'acquiescement pour la requête HO (*HO Request Ack response*) est envoyé à l'HeNB source via le nœud d'ancrage local à k-sauts comme illustré dans la figure 6.4.

À partir de ce moment, le nœud d'ancrage local source commence à dupliquer le trafic vers l'HeNB cible. D'une façon similaire à la procédure de transfert de trafic intradomaine, l'HeNB source émet une commande de relève (*Handover Command*) au véhicule en mouvement, qui se détache alors de son HeNB et tente de s'attacher à l'HeNB cible. Une fois que le véhicule est synchronisé avec succès avec sa nouvelle HeNB, une requête de commutation (*Local Path Switching*) est envoyée au nœud d'ancrage local source à travers le nœud d'ancrage local cible pour continuer à transférer le trafic sans sollicitation du réseau cœur EPC, comme décrit dans la figure 6.4. Enfin, l'HeNB cible envoie un message de libération des ressources (*Context release message*) à l'ancienne HeNB.

### 6.2.4 Procédure de mobilité inter-domaine

De la même manière que pour les procédures précédentes, la procédure de relève commence par le rapport de mesure qui indique une détérioration de la puissance / qualité de signal de la cellule courante, une demande de relève (*HO Request*) est envoyée alors au nœud d'ancrage local qui effectue une décision de relève. Si l'HeNB cible n'est pas servie par le nœud d'ancrage local actuel et que le nombre maximal K-sauts de transfert permis est dépassé, alors une demande de relève (*HO Request*) est immédiatement envoyée au nœud d'ancrage local cible.

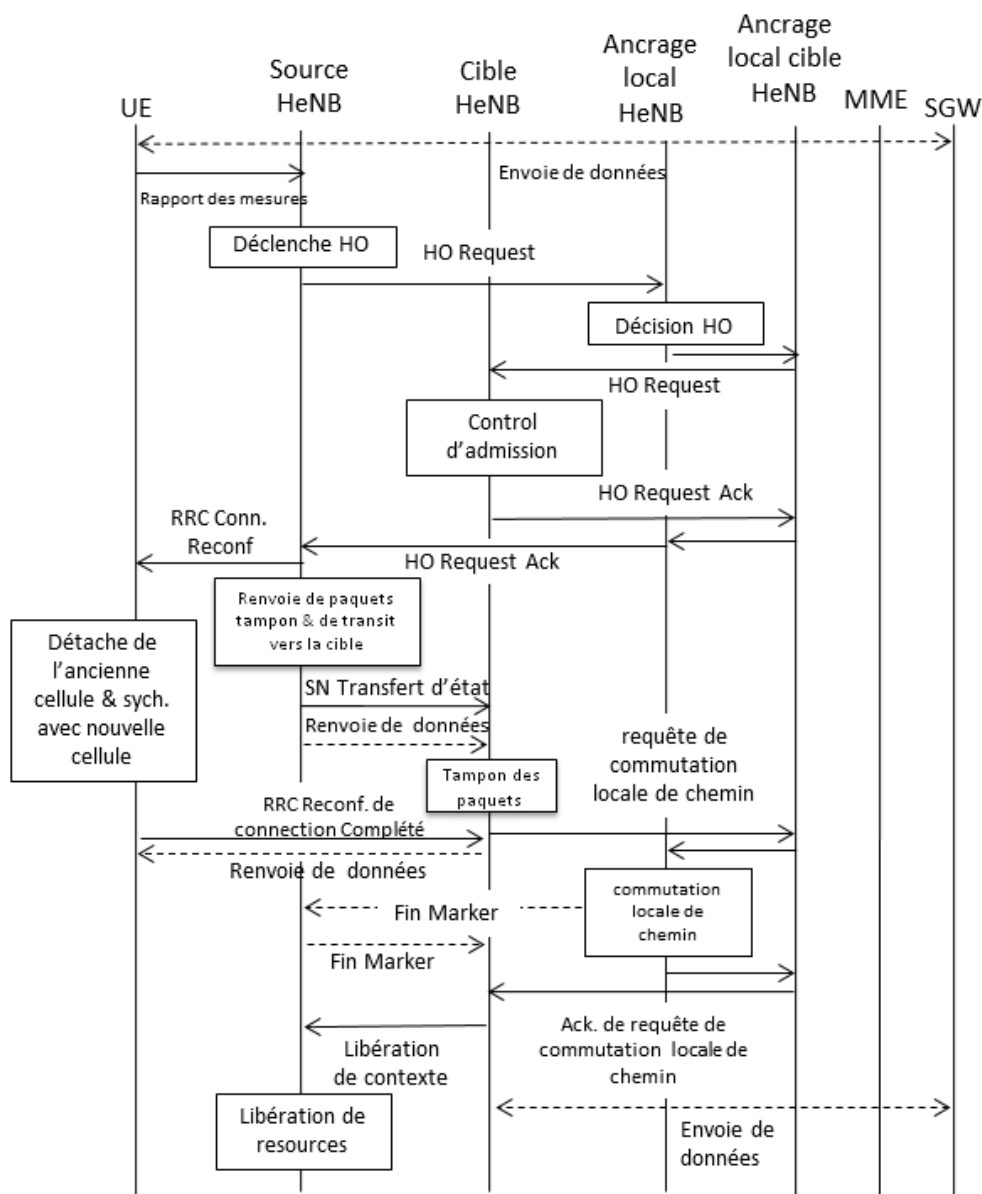


Figure 6.4 Procédure de HO k-sauts inter-domaine : type (b)

### 6.2.5 Procédure de mobilité inter-domaine

De la même manière que pour les procédures précédentes, la procédure de relèvement commence par le rapport de mesure qui indique une détérioration de la puissance / qualité de signal de la cellule courante, une demande de relèvement (*HO Request*) est envoyée alors au nœud d'ancrage local qui effectue une décision de relèvement. Si l'HeNB cible n'est pas servie par le nœud d'ancrage local actuel et que le nombre maximal K-sauts de transfert permis est dépassé, alors une demande de relèvement (*HO Request*) est immédiatement envoyée au nœud d'ancrage local cible.



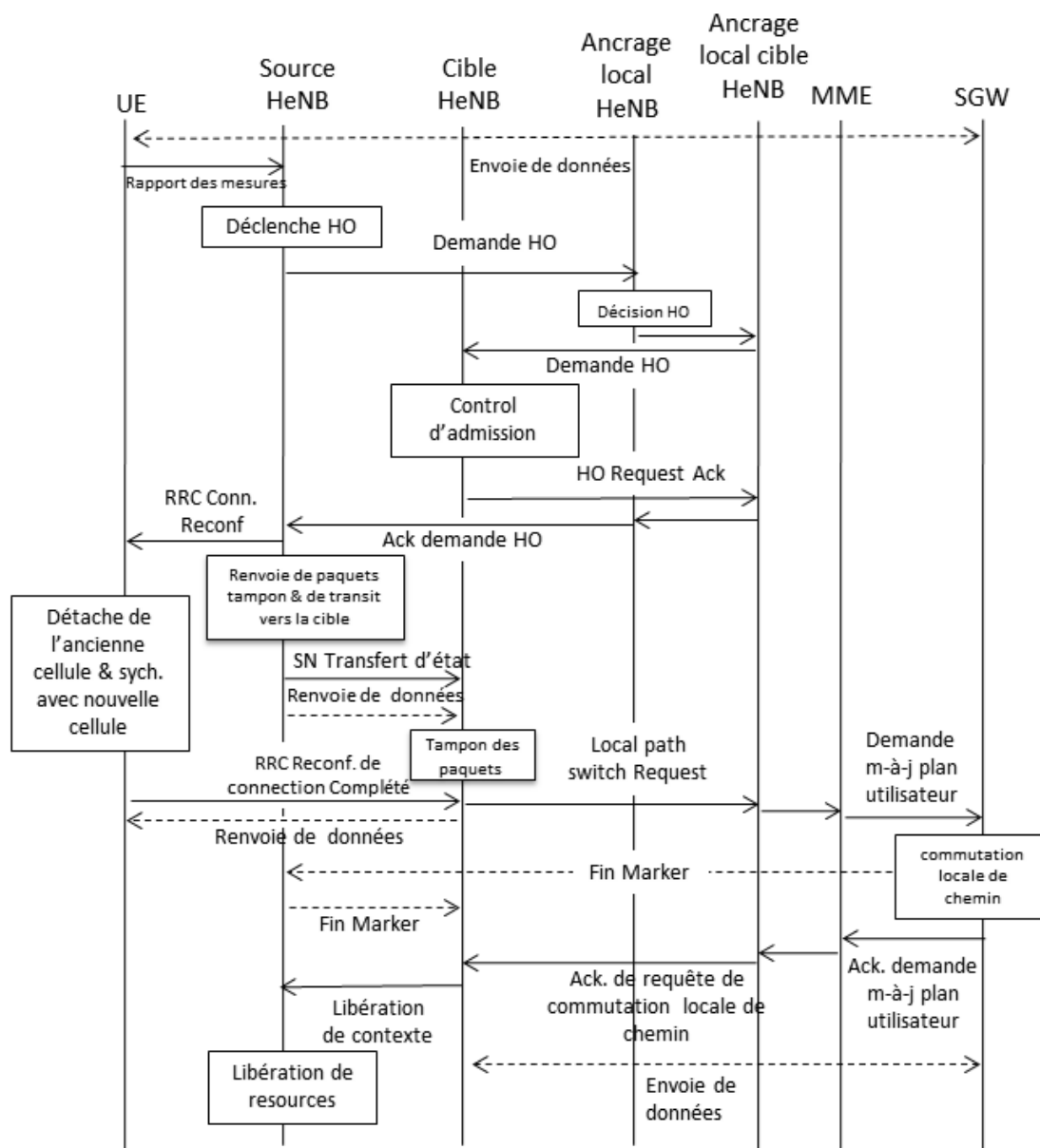


Figure 6.5 Procédure de HO inter-domaine de type (c).

La requête HO est ensuite transmise à l'HeNB cible qui effectue le contrôle d'admission. Ensuite, un message d'acquiescement pour la demande de relèvement (*HO Request Ack response*) est envoyé au nœud d'ancrage local source via le nœud d'ancrage local cible comme illustré dans la figure 6.5. À partir de ce moment, le nœud d'ancrage local source commence à dupliquer le trafic vers l'HeNB cible. D'une façon semblable à la procédure intra-domaine de transfert du trafic, la source HeNB émet une commande de relèvement (*Handover Command*) au véhicule en mouvement, qui se détache alors de son HeNB pour s'attacher à l'HeNB cible. Une fois que le véhicule est synchronisé avec

succès avec l'HeNB, une demande de commutation de chemin (*path switching*) avec l'EPC est faite par le nœud d'ancrage local cible tel que décrit dans la figure 6.5. Enfin, l'HeNB cible envoie un message de libération des ressources (*Context release message*) à l'ancienne source eNB.

## 6.3 Modèle analytique

Pour étudier l'efficacité du schéma de mobilité proposé, nous considérons la procédure de mobilité 3GPP présentée au niveau de la figure 6.2 comme un modèle référence de comparaison. Plus précisément, sur la base des procédures HO décrites auparavant, nous développons un modèle analytique pour évaluer le schéma de mobilité AMS proposé. Notons que dans cette section, nous nous concentrons sur l'impact de notre proposition AMS sur le coût de signalisation lors de la relève.

### 6.3.1 Préliminaire et notation

Nous considérons le scénario de mobilité d'un véhicule comme illustré dans la figure 6.6. Au cours de son mouvement, un véhicule peut effectuer soit une relève de type (a), (b) ou (c).

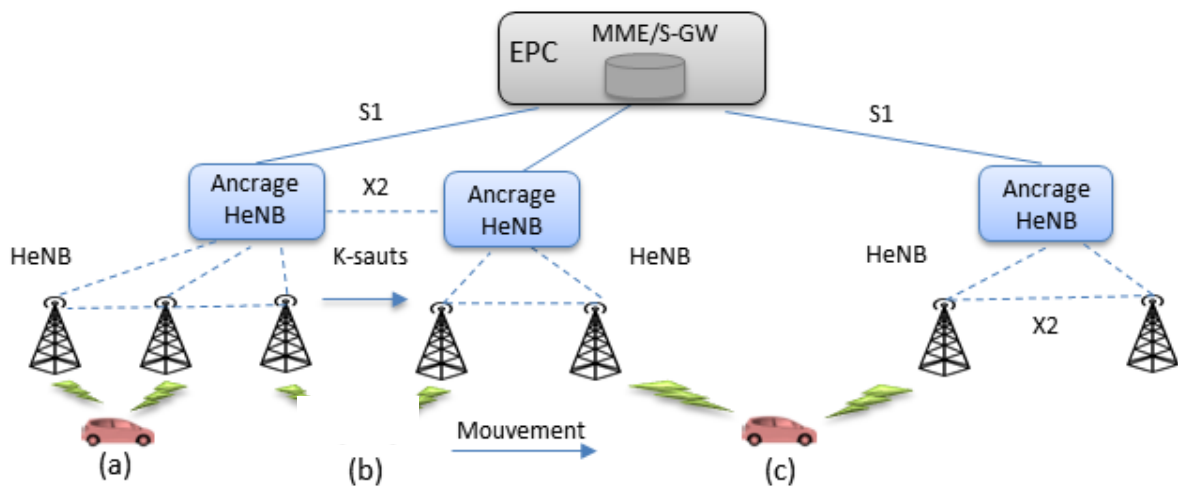


Figure 6.6 Scénario de relève d'un véhicule dans une autoroute urbaine.

où:

(a) désigne une relève entre deux HeNBs appartenant au même domaine d'ancrage

(b) désigne une relève entre deux HeNBs appartenant à des domaines d'ancrage différents, où le nombre de transferts entre les nœuds d'ancrages locaux consécutifs ne dépasse pas un seuil  $K$ -sauts prédéfinis

(c) désigne une relève entre deux HeNBs appartenant à différents domaines d'ancrage où le nombre de transferts entre les nœuds d'ancrages locaux consécutifs dépasse le seuil  $K$ -sauts prédéfinis.

Soit  $\mu_r$  le taux de franchissement de frontière d'une UE à travers n'importe quelle HeNB,

soit  $\mu_d$  le taux de franchissement de frontière d'une UE à travers les domaines d'ancrage,

soit  $\mu_l$  le taux de franchissement de frontière à travers les HeNBs lorsque l'UE reste à l'intérieur de même domaine d'ancrage HeNB,  $\mu_l$  est défini comme:  $\mu_l = \mu_r - \mu_d$

sous le modèle de mobilité *fluid-flow* [6],  $\mu_r$  peut être défini comme :  $\rho \cdot v \cdot L$ , où:  $\rho$  est la densité des véhicules,  $v$  est la vitesse moyenne de véhicule,  $L$  est la longueur/diamètre d'un sous-réseau.

Soit  $\varepsilon$  la probabilité de relèves effectuées à l'intérieur d'un domaine d'ancrage HeNB, c.-à-d., le pourcentage de relèves achevées dans le cas (a) comme montré dans la figure 6-6. Ainsi  $\varepsilon$  est défini comme:

$$\varepsilon = 1 - \frac{(N_{anchor\ HeNB} - 1)}{N_{HeNB}} \quad (6.1)$$

où :

$N_{anchor,HeNB}$ : est le nombre des noeuds d'ancrage  $N_{anchorHeNB} \geq 2$

$N_{HeNB}$ : est le nombre des HeNBs,  $N_{HeNB} \geq 2$

Afin d'obtenir une analyse précise des performances, il faut modéliser la distribution de probabilité du nombre de franchissements de frontière pendant une session du mobile [3]. Plusieurs modèles de distribution ont été proposés dans la littérature comme hyperErlang, Gamma, etc. Cependant, le modèle exponentiel reste un choix approprié, comme il est démontré dans [8]. Ainsi, pour simplifier, nous supposons que le temps de séjour du véhicule dans une HeNB et dans un domaine

d'ancrage HeNB suit une distribution exponentielle avec respectivement les paramètres  $\mu_r$  et  $\mu_d$ , tandis que le processus d'arrivée des sessions suit une distribution de Poisson de taux  $\lambda_s$ .

Par conséquent, si on note  $E(N_r)$  comme le nombre moyen des HeNB traversés,  $E(N_d)$  le nombre moyen des domaines d'ancrage traversés, et  $E(N_l)$  le nombre moyen de franchissements HeNB effectués à l'intérieur du même domaine d'ancrage HeNB, alors nous pouvons définir les moyennes ci-dessus comme [3]:

$$E(N_r) = \frac{\mu_r}{\lambda_s} \quad (6.2)$$

$$E(N_d) = (1 - \varepsilon) \cdot E(N_r) \quad (6.3)$$

Dans ce qui suit, nous utilisons les équations ci-dessus pour analyser les coûts de signalisation et de livraison de paquets du schéma de mobilité proposé.

### 6.3.2 Analyse du coût total de signalisation

On définit le coût total  $C_{total}$  comme suit :

$$C_{total} = C_{signal} + C_{delivery} \quad (6.4)$$

Le coût de signalisation correspond à la quantité de trafic de signalisation tandis que le coût de livraison des paquets représente la surcharge de réseau.  $C_{signal}$  Et  $C_{delivery}$  sont modélisés pendant un temps d'arrivée intersession, qui désigne l'intervalle de temps entre l'arrivée du premier paquet d'une session de données et l'arrivée du premier paquet de la prochaine session de données.

Dans le paragraphe suivant, nous nous concentrons sur l'estimation du coût total de signalisation pour notre schéma de mobilité AMS. En particulier, nous allons d'abord calculer le coût total de signalisation sans mise en grappes. Ensuite, nous ferons le même calcul en utilisant l'approche de mise en grappes.

### 6.3.3 Le coût total de signalisation d'AMS sans mise en grappes

Le coût total de signalisation d'AMS sans *mise en grappes* est défini comme suit :

$$C_{total}^{AMS} = C_{signal}^{AMS} + C_{delivery}^{AMS} \quad (6.5)$$

### 6.3.3.1 Le coût de signalisation d'AMS

Le coût de la signalisation d'AMS lorsqu'un véhicule effectue des relèves de type (a) (b) ou (c) est donné par:

$$C_{signal}^{AMS} = E(N_I) \cdot C_{car}^{HeNB} + E(N_D) \cdot \left[ \frac{k-1}{k} \cdot C_{car}^{k-hop, anchor-HeNB} + \frac{1}{k} \cdot C_{car}^{anchor-HeNB} \right] \quad (6.6)$$

où

$k$  : indique le nombre de domaines d'ancrage

$C_{car}^{HeNB}$  : désigne le coût de signalisation lorsqu'un véhicule effectue une relève de type (a),

$C_{car}^{k-hop, anchor-HeNB}$  : désigne le coût de signalisation quand une voiture utilise la procédure de relève k-domaines, relève de type (b).

$C_{car}^{anchor-HeNB}$  : désigne le coût de signalisation quand une voiture effectue une relève de type (c).

Les expressions relatives à  $C_{car}^{HeNB}$ ,  $C_{car}^{k-hop, anchor-HeNB}$  et  $C_{car}^{anchor-HeNB}$  sont données dans le tableau 6-1.

$T_X^Y$  désigne le coût de transmission entre le nœud X et le nœud Y,  $P_Z$  est le coût de traitement dans le nœud Z.

Tableau 6.1 Notation

$T_X^Y$	Coût de transmission entre le nœud X et Y
$T_s^a$	HeNB source et ancrage HeNB
$T_t^a$	HeNB et ancrage HeNB
$T_s^t$	HeNB source et HeNB cible
$T_c^s$	Véhicule et HeNB source
$T_c^t$	Véhicule et HeNB cible
$T_t^{ta}$	HeNB cible et ancrage HeNB cible
$T_a^{ta}$	ancrage HeNB (source) et ancrage HeNB cible
$T_{ta}^{MME}$	ancrage HeNB cible et MME
$T_{ta}^{SGW}$	ancrage HeNB cible et S-GW
$T_{MME}^{SGW}$	MME et S-GW
$P_X$	Coût de traitement au niveau du nœud X
$P_t$	HeNB cible
$P_s$	HeNB source
$P_a$	Ancrage HeNB
$P_{sa}$	ancrage HeNB source
$P_{ta}$	ancrage HeNB cible
$P_{MME}$	MME
$P_{SGW}$	S-GW
$l_X$	Coût de recherche au niveau du X
$l_{sa}$	ancrage HeNB source
$l_{ta}$	ancrage HeNB cible
$\eta_X$	Coût de Tunneling de paquet pour le nœud X
$\eta_{sa}$	ancrage HeNB source

Le coût  $T_X^Y$  peut être exprimé comme:

$$T_X^Y = (N_{hop}^{X,Y} - 1 + \delta)T_{hop}^c \quad (6.7)$$

où :

$N_{hop}^{X,Y}$  : est le nombre de sauts entre les nœuds X et Y.

$\delta$  : est la constante de proportionnalité pour illustrer que le coût de transmission multi-sauts au niveau sans fil est supérieur à celui réalisé au niveau filaire

$T_{hop}^c$  : est le coût de transmission par saut

### 6.3.3.2 Le coût de la livraison des paquets dans AMS

Soit  $A_p$  le nombre moyen des paquets reçus et envoyés par un véhicule mobile pendant la durée de vie d'une session. En se basant sur la figure 6-6, un véhicule donné peut effectuer des relèves de type (a), (b) ou (c). Ainsi, le coût de livraison des paquets AMS est donné par l'équation (6.8).

$$C_{delivery}^{AMS} = A_p \left[ T_{car}^{HeNB} + E(N_I)(l_{sa} + \eta_{sa}) + E(N_d) \left( \frac{1}{k} \cdot l_{ta} + \frac{k-1}{k} \cdot (l_{sa} + \eta_{sa}) \right) \right] \quad (6.8)$$

### 6.3.4 Estimation de la charge avec mise en grappes

L'introduction de l'approche de *mise en grappes*, développée dans le chapitre 5, dans l'architecture proposée, devrait réduire le coût global de la signalisation lié au backhaul LTE. En effet, à l'intérieur d'une grappe donnée, tous les services en cours passent par le véhicule représentant la passerelle GW sélectionnée. Par conséquent, si on note  $N_{cluster}$  le nombre de véhicules appartenant à une grappe, le coût total de signalisation du domaine de *grappe* est donné par:

$$C_{total}^{AMS,cluster} = C_{signal}^{AMS} + N_{cluster} \cdot C_{delivery}^{AMS} \quad (6.9)$$

où  $C_{signal}^{AMS}$  et  $C_{delivery}^{AMS}$  désignent respectivement les coûts, pour un véhicule, de signalisation et de livraison de paquets.

Tableau 6.2 Expression des coûts de signalisation

$C_{car}^{HeNB}$	$= 3T_s^a + 4T_t^a + 3T_s^t + T_c^s + T_c^t + 4P_t + 4P_s + 3P_a$
$C_{car}^{anchor\ HeNB}$	$= T_c^s + T_c^t + 3T_s^t + 3T_s^a + 3T_s^a + 4T_t^{ta} + 3T_a^{ta} + 2T_{ta}^{MME} + T_{ta}^{SGW}$ $+ 2T_{MME}^{SGW} + 4P_s + 5P_t + 3P_{sa} + 5P_t + 2P_{MME} + P_{SGW}$
$C_{car}^{k-hop\ anchor\ HeNB}$	$= T_c^s + T_c^t + 2T_s^t + 2T_s^{sa} + 3T_{sa}^{ta} + 3T_t^{ta} + 3P_s + 4P_t + 3P_{sa} + 3P_{ta}$
$C^{3GPP\ LTE-A}$	$= 5T_s^t + T_c^s + T_c^t + 2T_t^{MME} + 2T_{MME}^{SGW} + T_s^{SGW} + 4P_s + 3P_t + 2P_{MME}$ $+ P_{SGW}$

En conséquence, l'approche proposée de *mise en grappes* réduit le coût global de signalisation, pour les véhicules par :

$$\Delta C_{total\ signaling} = (N_{cluster} - 1) \cdot C_{signal}^{AMS} \quad (6.10)$$

Notez que le coût de signalisation V2V n'est pas considéré dans notre formulation, car elle n'affecte pas directement la charge de signalisation au niveau du backhaul LTE.

### 6.3.5 Coût total de la signalisation de la procédure de mobilité de 3GPP

Le coût total de la procédure 3GPP LTE-A est défini par :

$$C_{total}^{3GPP} = C_{signal}^{3GPP} + C_{delivery}^{3GPP} \quad (6.11)$$

En utilisant la procédure de relè 3GPP LTE-A décrite sur la figure 6.2, le coût de signalisation est donné par :

$$C_{signal}^{3GPP-LTE-A} = E(N_r) \cdot C^{3GPP-LTE-A} \quad (6.12)$$



où :

$$C^{3GPP\ LTE-A} = 5T_s^t + T_c^s + T_c^t + 2T_t^{MME} + 2T_{MME}^{SGW} + T_s^{SGW} + 4P_s + 3P_t + 2P_{MME} + P_{SGW} \quad (6.13)$$

Le coût de livraison des paquets est donné par :

$$C_{delivery}^{3GPP} = A_p [T_{car}^{SGW} + E(N_r)(l_{SGW} + l_{sa} + \eta_{SGW} + \eta_{HeNB})] \quad (6.14)$$

## 6.4 Analyse des performances

En nous basant sur le modèle analytique présenté dans la section précédente, nous présentons dans ce qui suit les principaux résultats. Les paramètres utilisés les simulations sont donnés au tableau 6.3.

Tableau 6.3 Paramètres des simulations

Paramètres	Symboles	Valeurs
HeNB rayon (m)	$R_s$	150
Taux de franchissement de la frontière de HeNB	$\mu_r$	495
Taux de franchissement de la frontière du domaine d'ancrage HeNB	$\mu_d$	82
Nombre d'HeNB	$M$	100
Nombre de nœuds d'ancrage	$M_a$	15
Densité (véhicules/km)	$\rho$	30
Vitesse moyenne des véhicules (km/h)	$v$	60
Taux d'arrivée des sessions	$\lambda_s$	1
Moyenne des paquets reçue et envoyée par UE	$A_p$	50
Coût de Recherche au niveau du noeud X	$l_X$	1
Coût de Tunneling paquet au noeud X	$\eta_X$	1

Dans ce qui suit, nous discutons les résultats obtenus sur la base du modèle présenté dans la section précédente.

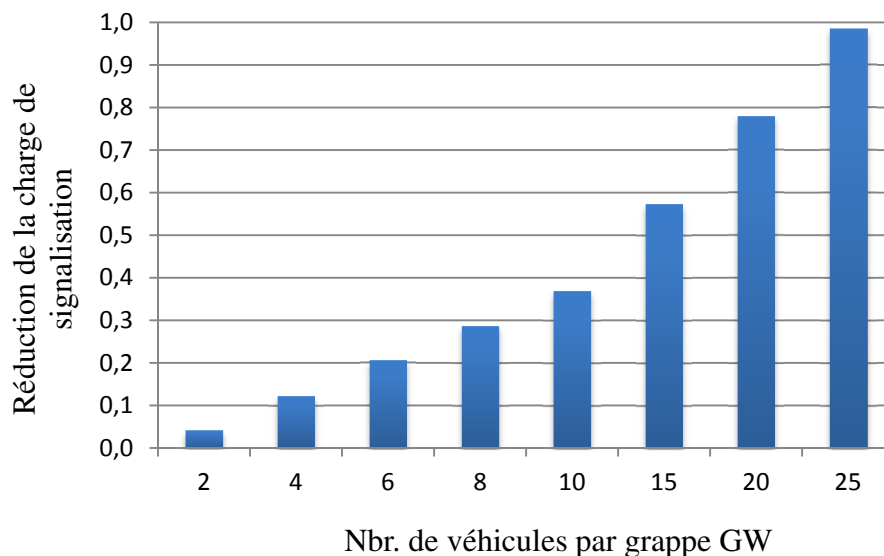


Figure 6.7 Réduction de la charge de signalisation en fonction du nombre de véhicules par grappe

Comme mentionné précédemment, l'introduction de l'approche de mise en grappes avec passerelles au niveau des véhicules vise, entre autres, à réduire la charge de signalisation dans le réseau LTE. Les passerelles demeurent les seuls véhicules qui communiquent via leurs interfaces LTE avec les HeNBs. Pour mesurer l'impact de cette proposition, nous montrons la réduction au niveau de la charge de signalisation en fonction du nombre de véhicules par passerelle, comme illustré sur la figure 6.7. Nous remarquons que la réduction au niveau de la charge de signalisation est proportionnelle à la taille de grappe. Alors qu'il peut être intéressant d'augmenter le nombre de véhicules par passerelle afin de réduire la charge de signalisation relative à la mobilité, cependant, cela peut générer plus de collisions au niveau de la communication DSRC (couche MAC de l'IEEE 802.11p). En conséquence, pour utiliser efficacement la capacité de liaison DSRC tout en réduisant la charge de signalisation au niveau du réseau LTE, le nombre de véhicules par passerelle devrait être limité. Par conséquent, nous devons tenir compte de ces limites lors de la formation des grappes GW.

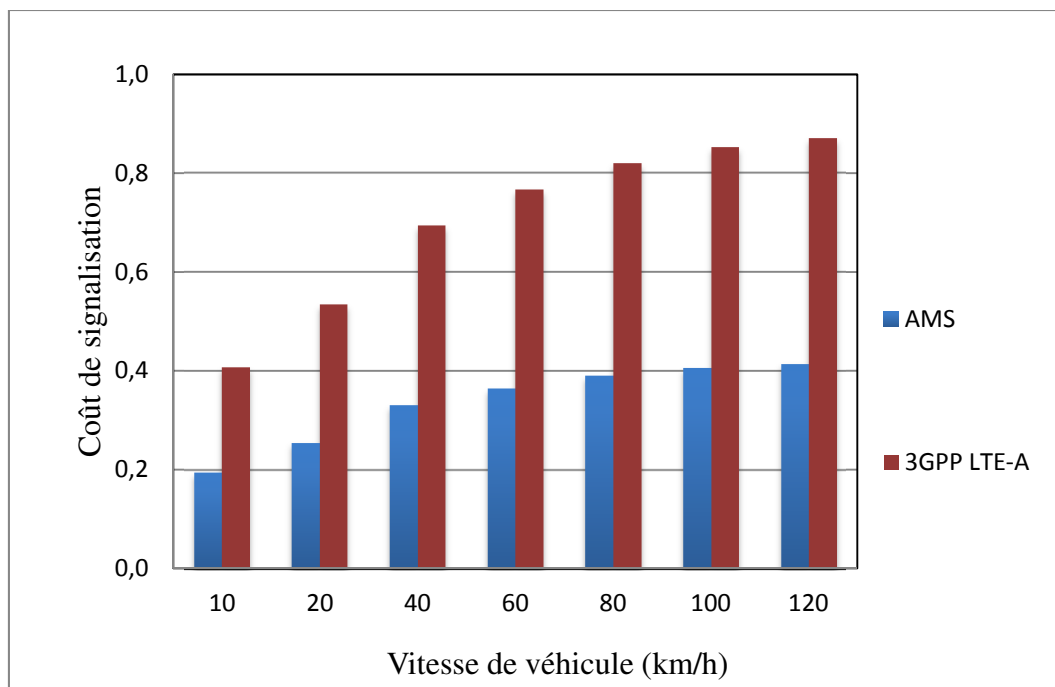


Figure 6.8 Impact de la vitesse des véhicules sur la charge de signalisation

La figure 6.8 montre la variation du coût total de signalisation en fonction de la vitesse des véhicules. On peut noter que le coût de signalisation de notre schéma de mobilité AMS est inférieur à celui de la 3GPP LTE-A, et cela pour différents scénarios de vitesses. Plus spécifiquement, à faible vitesse, un véhicule donné devrait connaître un temps de séjour élevé comparativement aux situations des vitesses élevées. Cela explique pourquoi le coût global de signalisation est faible lorsque les véhicules se déplacent à faible vitesse comme il est montré dans la figure 6-8. D'autre part, lorsque la vitesse des véhicules augmente, le schéma AMS offre de bonnes performances en réduisant le coût total de signalisation comme il est illustré par l'augmentation de l'écart entre AMS et le schéma de mobilité de la 3GPP LTE-A. En outre, ce résultat montre également l'impact de la densité de véhicules, car ce critère est inversement proportionnel à la vitesse.

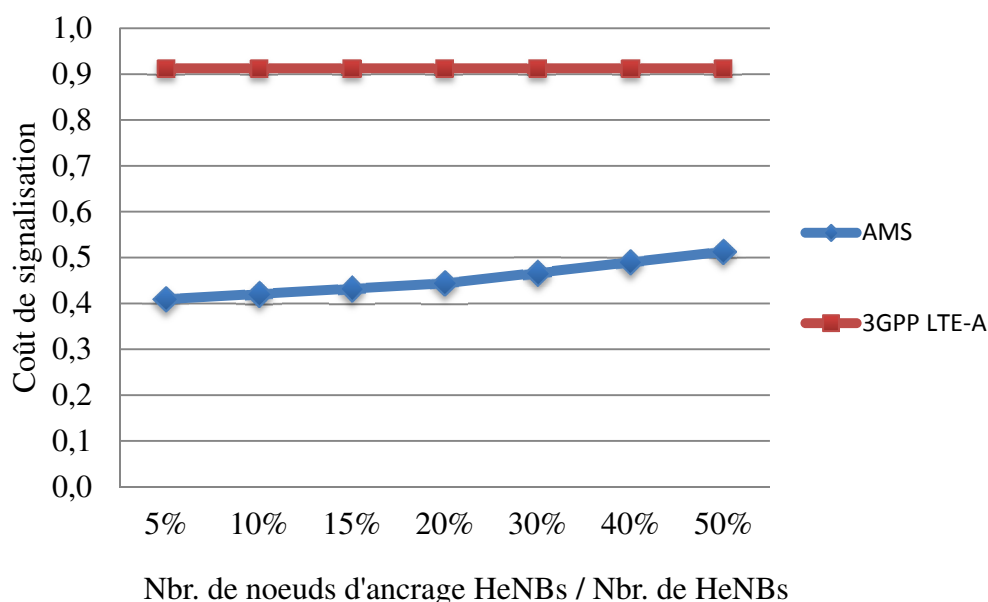


Figure 6.9 Impact du nombre d'unités d'ancrage sur la charge de signalisation

Comme illustré dans la figure 6.6, un nœud d'ancrage communique par le biais de son interface X2 avec d'autres HeNBs pour former ce que nous appelons un domaine d'ancrage virtuel.

La figure 6.9 montre l'impact de la taille de domaine d'ancrage dans une architecture donnée avec 100 HeNBs. La première remarque à noter est que la procédure de mobilité de la 3GPP LTE-A n'utilise pas les nœuds d'ancrage proposés ; c'est pourquoi le coût total de signalisation reste invariable. Cependant, nous constatons que le coût total de signalisation d'AMS dépend du nombre de domaines d'ancrage. Plus précisément, lorsque chaque deux eNBs constituent un domaine d'ancrage (c.-à-d., le nombre d'unités d'ancres est à 50% des eNBs), le coût total de signalisation normalisé est relativement élevé, mais il reste inférieur au coût de signalisation de la procédure de mobilité de la 3GPP. Lorsque le nombre d'unités d'ancrage diminue (c.-à-d., la taille d'un domaine d'ancrage devient plus grande), le coût total de signalisation d'AMS diminue aussi. Ce résultat illustre le fait que, avec de grands domaines d'ancrage, les véhicules mobiles effectuent des relèves locales plutôt que des relèves interdomaines. Cela signifie que le réseau cœur EPC ne sera pas sollicité à chaque fois qu'une voiture effectue une relève au niveau d'un HeNB. Néanmoins, il est impossible pour un nombre limité d'unités d'ancrage pour servir tous les véhicules, en particulier pendant les heures de pointe, car les unités d'ancrage ont une capacité et des ressources limitées.

Ainsi, il est très important de trouver un compromis entre la couverture de domaine et la densité de véhicules, ce qui est hors de la portée de ce travail.

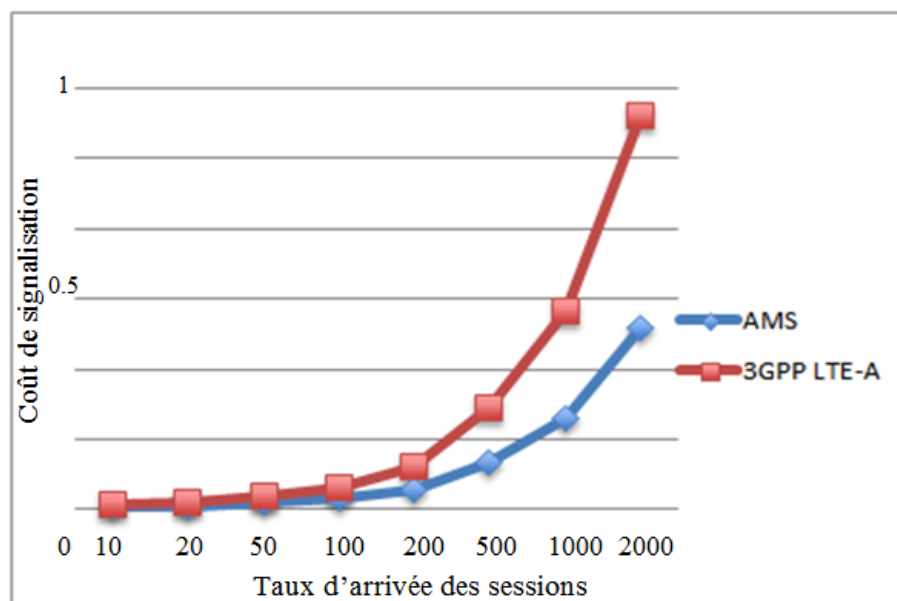


Figure 6.10 Impact du taux d'arrivée des sessions sur la charge de signalisation

Pour montrer l'influence de l'augmentation du trafic de l'utilisateur sur la solution proposée, nous illustrons, dans la figure 6.10, l'impact des sessions en cours sur la charge totale de signalisation. Il est clair que lorsque l'arrivée moyenne des paquets augmente, le coût de signalisation lié à AMS est relativement plus faible que celui de la signalisation générée par la procédure standard de la 3GPP LTE-A. Ce résultat est tout à fait normal puisque la charge de signalisation relative à la relève est gérée localement par l'unité d'ancrage dans notre modèle tandis qu'elle est centralisée au niveau du réseau cœur EPC pour la 3GPP LTE-A.

## 6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une architecture de convergence VANET-LTE-A. Cette architecture se base sur le schéma de mobilité (*anchor mobility scheme*-AMS) pour petites cellules qui vise à réduire la surcharge de signalisation vers le réseau cœur en introduisant des unités logiques d'ancrage, ainsi que le schéma de sélection de passerelles mobiles proposé dans le chapitre 5. Trois procédures de relève ont été proposées, à savoir intradomaine, k-sauts interdomaines et

interdomaines. Ces procédures permettent d'assurer la continuité du service aux véhicules circulant à l'intérieur ou à l'extérieur des domaines des nœuds d'ancrage. Afin d'étudier l'efficacité des schémas proposés, nous avons développé un modèle analytique sur la base des procédures de relève proposées. Les résultats numériques ont montré l'efficacité de notre schéma de mobilité pour réduire la charge de signalisation générée vers le réseau cœur. En particulier, au niveau des passerelles mobiles, nous avons montré que le gain au niveau de la charge de signalisation relative à la relève est proportionnel à la taille de grappe (nombre de véhicules par passerelle). Alors qu'il peut être intéressant d'augmenter le nombre de véhicules par passerelle, cela risque de générer plus de collisions au niveau de la communication DSRC, et ainsi réduire le débit au niveau des liaisons DSRC. Au niveau de la taille de grappes formées par les petites cellules (nombre de petites cellules par unité d'ancrage), nous remarquons une diminution de la charge de signalisation. Cependant étant donné la limite de capacité des petites cellules et des liens X2, il est important de trouver un compromis entre ces deux facteurs (c.-à-d. taille des grappes et capacité des petites cellules et des liens X2).

## CHAPITRE 7

### CONCLUSION

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'intégration véhicule infrastructure. L'objectif général est de proposer une architecture pour véhicule connecté basée sur la localisation coopérative, la communication V2I et la gestion de mobilité dans les réseaux mobiles HetNet pour une meilleure intégration VANET – réseau mobile.

#### 7.1 Revue des principales contributions

Cette thèse a donné lieu à trois principales contributions:

- Dans le premier volet de cette thèse, nous avons proposé deux nouveaux algorithmes de localisation coopérative basés sur une approche ensembliste. Le premier algorithme, appelé CLES (Cooperative Localization with Enhanced Set-membership), est un algorithme général pour la localisation coopérative basée sur l'approche ensembliste, qui permet d'améliorer la précision de localisation pour différentes approches (signatures de signal, GNSS, etc.). Ensuite, comme application de l'algorithme CLES à la localisation par approche des signatures de signal, nous avons proposé l'algorithme CLEF (Cooperative Localization with Enhanced Fingerprinting). Afin d'évaluer la performance des deux algorithmes (CLES et CLEF) au niveau de la précision, nous avons procédé à des simulations. Pour l'algorithme CLES, nous avons caractérisé et évalué la précision de localisation en fonction de la précision de mesure de la distance, la configuration géométrique, et la proximité des nœuds par rapport aux frontières du polygone. Pour l'algorithme CLEF, nous avons procédé à des mesures réelles pour les signatures de signal dans un environnement intérieur, puis nous avons utilisé notre simulateur pour évaluer statistiquement l'erreur de localisation donnée par notre algorithme. Pour ce faire, nous avons généré la fonction de répartition (CDF) de l'erreur de positionnement, puis déterminé l'erreur moyenne et l'erreur médiane pour différentes valeurs de la précision de mesure de la distance, et pour un nombre de variable de nœuds. Nous avons montré que, par rapport à l'approche des signatures standard, pour un nombre moyen de 10 nœuds avec une précision moyenne au niveau de la distance de l'ordre de 1 mètre, on obtient une amélioration

de l'ordre 18.8%, et de 34% pour 22 nœuds. Par ailleurs, pour une bonne précision au niveau de distance de l'ordre de 0.25 mètre et un nombre moyen de 22 nœuds, on a un pourcentage d'amélioration de l'ordre de 46% en moyenne. Ces résultats prouvent la performance nettement supérieure des algorithmes proposés par rapport aux méthodes standards.

Enfin, nous soulignons que les algorithmes CLES et CLEF pourraient très bien s'appliquer pour la localisation extérieure. De plus, avec le déploiement massif prévu des petites cellules (4G, 5G), les algorithmes proposés seraient très utiles pour la localisation précise et pour générer des cartes de signal d'une plus grande précision qui pourraient être exploitées pour l'amélioration de la gestion de relève et pour une sélection efficace des passerelles mobiles (traité au niveau du volet 2).

- Dans le deuxième volet de cette thèse, nous avons proposé un nouvel algorithme pour une sélection efficace des passerelles mobiles dans une architecture intégrée VANET-réseau mobile. Cet algorithme permet de relayer le trafic des véhicules voisins vers les petites cellules du réseau mobile (ex. LTE-A) en utilisant la communication DSRC/WAVE. L'agrégation du trafic des véhicules voisins vers un nombre limité de véhicules passerelles permet plusieurs avantages pour la communication V2I, tels que la réduction de la charge de signalisation pour la gestion de relève, l'extension de la couverture des petites cellules en utilisant la communication V2V, la réduction du nombre d'UE connectées par petite cellule. Pour ce faire, nous avons formulé le problème de sélection des passerelles mobiles comme un problème de programmation linéaire binaire multi-objectif (MO-BIP). Ensuite, afin d'analyser le temps de calcul, nous avons implémenté notre modèle en utilisant un outil de résolution par programmation linéaire, et nous avons montré son efficacité pour différents degrés de connectivité et un nombre de véhicules variable (30 à 50 véhicules par petite cellule).
- Dans le troisième volet de cette thèse, nous avons proposé une architecture de convergence VANET-LTE-A. Cette architecture se base sur un schéma de mobilité pour petites cellules du réseau mobile LTE-A, qui vise à réduire la surcharge de signalisation vers le réseau cœur en introduisant des unités logiques d'ancrage, ainsi que le schéma de sélection de passerelles mobiles proposé dans le volet 2. Trois procédures de relève ont été proposées, à savoir intra-domaine, k-sauts inter-domaines et inter-domaines. Ces procédures permettent d'assurer la continuité du service aux véhicules circulant à l'intérieur ou à l'extérieur des domaines des



nœuds d’ancrage. Afin d’étudier l’efficacité des schémas proposés, nous avons développé un modèle analytique sur la base des procédures de relève proposées. Les résultats numériques ont montré l’efficacité de notre schéma de mobilité pour réduire la charge de signalisation générée vers le réseau cœur. En particulier, au niveau des passerelles mobiles, nous avons montré que le gain au niveau de la charge de signalisation relative à la relève est proportionnel à la taille de grappe (nombre de véhicules par passerelle). Alors qu’il peut être intéressant d’augmenter le nombre de véhicules par passerelle, cela risque de générer plus de collisions au niveau de la communication DSRC, et ainsi de réduire le débit au niveau des liaisons DSRC. Au niveau de la taille de grappes formées par les petites cellules (nombre de petites cellules par unité d’ancrage), nous remarquons une diminution de la charge de signalisation. Cependant, étant donné la limite de capacité des petites cellules et des liens X2, il est important de trouver un compromis entre ces deux facteurs (c.-à-d. taille des grappes et capacité des petites cellules et des liens X2).

## 7.2 Limitations des travaux

Les problématiques d’intégration véhicule infrastructure demeurent ouvertes. Loin de prétendre à l’exhaustivité, les contributions proposées dans le cadre de cette thèse ont pu, à notre avis, apporter des éléments de solutions aux problématiques abordées. Dans cette section, nous présenterons certaines limites des travaux présentés dans cette thèse.

Au niveau du premier volet (localisation coopérative avec signatures de signal), parmi les limites des travaux qui pourraient donner lieu à des améliorations, il convient de noter les points suivants : au niveau de l’étape de réduction par intersection des polygones, la robustesse de l’intersection et la gestion des cas de réduction, qui engendrent plusieurs polygones d’appartenance pour un nœud donné, n’ont pas été traités. Toutefois, en utilisant des algorithmes d’intersection robustes tels que proposés dans [31], ces éléments pourraient s’ajouter comme extension aux algorithmes CLES et CLEF, et pourraient facilement être intégrés à notre simulateur. Par ailleurs, bien qu’au niveau de la validation de l’algorithme CLEF, nous ayons utilisé des mesures de signatures de signal à partir de mesures réelles, les mesures des distances inter-nœuds et la validation de l’algorithme CLEF ont été faites par simulation. Avec la disponibilité des modules sans fil avec capacité de mesure de

distance (ex. UWB), il devient envisageable de développer un banc d'essai pour la validation de l'algorithme CLEF dans le monde réel.

Au niveau du deuxième volet (sélection des passerelles mobiles), étant donné la portée limitée des petites cellules par rapport à la portée de communication DSRC, et afin de limiter la croissance du nombre d'états et le risque d'explosion combinatoire au niveau de l'algorithme de sélection des passerelles mobiles, la communication avec la passerelle mobile a été limitée à un seul saut. L'algorithme proposé permet ainsi d'avoir des solutions satisfaisantes dans un temps de réponse adéquat. Toutefois, pour des cellules de grande taille, il est possible d'étendre notre algorithme de sélection des passerelles aux communications multi-sauts. Cela nécessiterait la mise en œuvre de méthodes de résolution plus élaborées (ex. méta heuristiques) et l'étude des compromis entre le temps de calcul et le gain par rapport à l'approche limitée à un seul saut.

Au niveau du troisième volet (architecture de convergence VANET-LTE-A et gestion de relève au niveau des petites cellules), par souci de concision, nous avons seulement considéré le cas de mobilité intra- MME/S-GW ; nous n'avons pas considéré d'autres cas de figure pour la mobilité comme le cas inter-MME/S-GW ou la mobilité entre réseaux avec différentes technologies d'accès inter-RAT (ex. 4G/3G). Cependant, on pourrait appliquer la même démarche d'analyse utilisée dans cette thèse, moyennant des changements au niveau des procédures de relève.

### 7.3 Travaux futurs

Dans cette section, nous aborderons quelques propositions de recherche que nous considérons comme des sujets potentiels à considérer dans le futur. Certaines d'entre elles découlent des limitations ci-dessus énoncées.

Au niveau de la localisation coopérative, nous pouvons citer les pistes suivantes :

- Considérer la robustesse de l'intersection en utilisant des algorithmes d'intersection robustes tels que proposés dans [28] [32], et la gestion des cas de réduction avec plusieurs polygones.
- Considérer la mobilité des nœuds dans l'algorithme de réduction en exploitant différentes techniques et capteurs. En effet, comme expliqué dans le chapitre sur la localisation, l'utilisation hybride de la technique inertielle avec une technique de localisation globale

(GNSS) ou radiolocalisation permet de réajuster périodiquement, ou selon la demande, la précision donnée par la localisation inertielle. Avec la mobilité des nœuds, nous pouvons saisir l'opportunité d'une bonne configuration des nœuds pour appliquer l'algorithme de localisation coopérative et ainsi réajuster la dérive de l'unité inertielle. De plus, étant donné que la localisation basée sur GNSS subit une dégradation de la précision dans les zones avec accès difficile ou avec multi-chemin (Multipath) du signal satellite (dans les 'canyons' urbains, tunnels, etc.), l'utilisation d'autres techniques et capteurs est alors nécessaire, comme la technique de cartographie (Map-matching), LIDAR, traitement et reconnaissance d'images vidéo, etc.

Au niveau de la sélection de passerelles mobiles et la gestion de mobilité, nous pouvons citer les pistes suivantes :

- L'algorithme de sélection de passerelles mobiles pourrait être adapté au contexte non véhiculaire, où des usagers (piétons avec téléphone mobile) coopèrent dans un réseau ad hoc ou de type LTE-A D2D (Device to Device) en sélectionnant des passerelles pour relayer le trafic vers les petites cellules du réseau LTE-A.
- L'algorithme de sélection des passerelles pourrait être étendu aux communications multi-sauts. Cela nécessiterait la mise en œuvre de méthodes de résolution plus élaborées (ex. méta heuristiques) et l'étude des compromis entre temps de calcul et gain par rapport à l'approche limitée à un seul saut.

Alors que la technologie 4G avec LTE-A est à peine installée l'industrie parle déjà de la 5G. Toutefois, à la date de rédaction de cette thèse, les informations autour de cette technologie restent essentiellement de nature spéculative. En effet, l'ITU vient juste d'établir la feuille de route pour le développement des spécifications techniques détaillées du réseau mobile 5G [79]. Cependant, la 5G sera basée, vraisemblablement, sur plusieurs des technologies développées ou en cours de développement pour la LTE-A, telles que la densification du réseau à l'aide de petites cellules, relais (fixes, mobiles), la connectivité double (Dual Connectivity, DC), communication D2D, l'agrégation de porteuses (Carrier Aggregation, CA), réseau SON, MIMO massive, etc.

Eu égard aux solutions proposées dans cette thèse, nous croyons que parmi les technologies, susmentionnées, qui pourraient bénéficier de nos contributions, il y a :

- La connectivité double (DC). Grâce à la DC, le mobile pourrait se connecter simultanément à deux ou plusieurs cellules. En considérant le schéma de mobilité k-sauts inter-domaine basé sur les nœuds d'ancrage, notre schéma pourrait être appliqué à un réseau HetNet où la macro-cellule jouerait le rôle d'un nœud d'ancrage pour la mobilité et appuierait les nœuds d'ancrage des petites cellules pour réduire la signalisation vers le réseau cœur.
- La communication D2D (Device 2 Device) et l'agrégation de porteuses (Carrier Aggregation, CA). La solution de sélection de passerelles mobile proposée dans cette thèse pourrait très bien s'appliquer à la communication D2D. Dans cette optique, les communications D2D avec la largeur de bande offerte par CA pourraient aider à désengorger le réseau V2V DSRC (au moins pour les communications courtes et moyennes portée). L'utilisation de nouvelles bandes de fréquences (millimetric wave band) prévues pour la 5G pourrait certainement aider dans ce sens.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Benslimane, T. Taleb et R. Sivaraj, "Dynamic Clustering-Based Adaptive Mobile Gateway Management in Integrated VANET - 3G Heterogeneous Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29 (3), pp. 559-570, March 2011.
- [2] A.S. Chekkouri, A. Ezzouhairi, S. Pierre, X2 based local mobility management for networked femtocells, in: *IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2013)*, 7–9 October 2013, pp. 622, 629.
- [3] C. Makaya, S. Pierre, "An analytical framework for performance evaluation of IPv6-based mobility management protocols", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.7, no.3, pp.972-983, March 2008.
- [4] GUROBI optimization, [En ligne].2015, <http://www.gurobi.com> (Page consultée le 1 Mai 2015)
- [5] J. Harding, Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems (CICAS). [En ligne].2014: <http://www.its.dot.gov/cicas> (Page consultée le 1 Nov 2014)
- [6] M. Treiber and A. Kesting "Traffic Flow Dynamics", *Springer*, 2013.
- [7] 3GPP TR 36.836: "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Study on mobile relay" (Release 12) 2014.
- [8] G. Zhioua, N. Tabbane, H. Labiod, S. Tabbane, "A Fuzzy Multi-Metric QoS-Balancing Gateway Selection Algorithm in a Clustered VANET to LTE Advanced Hybrid Cellular Network," *IEEE Transactions on in Vehicular Technology*, vol.64, no.2, pp.804-817, Feb. 2015.
- [9] M. Khabbaz, W. Fawaz, C. Assi, "A Simple Free-Flow Traffic Model for Vehicular Intermittently Connected Networks" *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 3, pp.1312 -1326, 2012.
- [10] T. Guo, A. ul Quddus, N. Wang, and R. Tafazolli, "Local Mobility Management for Networked Femtocells Based on X2 Traffic Forwarding", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 1, pp. 326–340, Jan. 2013.

- [11] G. Remy, S.-M. Senouci, F. Jan, Y. Gourhant, "LTE4V2X: LTE for a Centralized VANET Organization," 2011 IEEE *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, vol., no., pp.5-9, Dec. 2011.
- [12] Y. Xiao, Y. Pan, J. Li, Design and analysis of location management for 3G cellular networks, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 15, no. 4, pp.339-349 2004.
- [13] L. Wang, Y. Zhang, Z. Wei, "Mobility management schemes at radio network layer for LTE femtocells," in *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009*. IEEE 69th, vol., no., pp.1-5, 26-29 April 2009.
- [14] U. Narayanan, J. Xie, "Signaling Cost Analysis of Handoffs in a Mixed IPv4/IPv6 Mobile Environment", in *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM '07*. IEEE, vol., no., pp.1792-1796, 26-30 Nov. 2007.
- [15] M. Grossglauser, D. N. C. Tse, "Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, no. 4, pp. 477– 486, Aug. 2002.
- [16] W. Su, S.-J. Lee, M. Gerla, "Mobility prediction and routing in ad hoc wireless networks," *International Journal of Network Management*, v.11 n.1, p.3-30, January–February 2001.
- [17] IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems-LAN/MAN Specific Requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) *specifications-Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)*, July 2010.
- [18] 3GPP TR 36.839 v11.1.0, "Mobility Enhancements in Heterogeneous Networks (Release 11)," Dec. 2012
- [19] Z. Hameed Mir, Z. Filali, " LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2014, pp.89 2014.
- [20] 3GPP TS 36.213: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 12) ", Mars 2015
- [21] Y. Fang, "Movement-based mobility management and trade off analysis for wireless mobile networks," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 52, no. 6, pp. 791–803 JUNE 2003

- [22] H. Y. Pan, R. H. Jan, A. K. Jeng, H. R. Tseng, "Mobile-gateway routing for vehicular networks," in *Proceedings of the IEEE 8th Asia Pacific Wireless Communication Symposium*, 2011.
- [23] J. Luo; X. Gu; T. Zhao; W. Yan, "A Mobile Infrastructure Based VANET Routing Protocol in the Urban Environment," in *Proceeding of the 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC)*, vol.3, no., pp.432-437, 12-14 April 2010
- [24] B.T. Sharef, R.A. Alsaqour, M. Ismail, "Vehicular communication ad hoc routing protocols: A survey, " *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 40, pp. 363–396 April 2014.
- [25] 3GPP TS 36.300: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall Description; Stage 2".
- [26] "Femtocells — Natural Solution for Offload," white paper by Femto Forum, [En ligne].2014, <http://www.smallcellforum.org>, (Page consultée le 1 Nov 2014)
- [27] R. Balakrishnan, I. Akyildiz, "Local Anchor Schemes for Seamless and Low-cost Handover in Coordinated Small Cells," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.PP, no.99, pp.1-1, 2015.
- [28] L. Jaulin. "Robust set membership state estimation; application to underwater robotics," *Automatica*, 45(1):202–206, 2009.
- [29] L. Jaulin, M. Kieffer, O. Didrit, and E. Walter. *Applied Interval Analysis*. Springer, 2001.
- [30] J. Levinson, M. Montemerlo, S. Thrun, "Map-Based Precision Vehicle Localization in Urban Environments," in *Robotics: Science and Systems*, 2007.
- [31] C. Carbonnel, G. Trombettoni, G. Chabert. "Q-intersection Algorithms for Constraint-Based Robust Parameter Estimation," in *Twenty-Eighth Conference on Artificial Intelligence*, 2014.
- [32] X. R. Chen, S. McMians, "Polygon offsetting by computing winding numbers," in *Proceedings of the DETC/CIE 2005 ASME International Design Engineering Technical Conference & computers and information in Engineering Conference*, Long beach, California, USA, pp.24-28, 2005.
- [33] A. Menditto, M. Patriarca, B. Magnusson, "Understanding the meaning of accuracy, trueness and precision," *Accreditation and Quality Assurance*, vol. 12, Issue1, pp.45-47 2007.
- [34] V. Drevell e and P. Bonnifait, "A set-membership approach for high integrity height-aided satellite positioning," *GPS Solutions*, vol. 15, no. 4, pp. 357–368, 2011.

- [35] BS ISO 5725-1: "Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions", p.1 (1994)
- [36] International vocabulary of metrology, "Basic and general concepts and associated terms (VIM) ", JCGM 2008, 2008.
- [37] P. Van Oort, "Spatial data quality: from description to application," PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2005.
- [38] A. Hatami, K. Pahlavan, "Hybrid TOA-RSS Based Localization Using Neural Network", *IEEE Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2006*, 2006.
- [39] M. Neuland, T. Kurner, M. Amirijoo, "Influence of Different Factors on X-Map Estimation in LTE," *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd* , vol., no., pp.1,5, 15-18 May 2011.
- [40] Dana, P.: Global Positioning System Overview [En ligne].2015.  
<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html> (Page consultée le 1 Mai 2015)
- [41] G. McElroy, "Loran-C History", in Proceeding, Jerry, Hyperbolic Radionavigation Systems, Etobicoke, Ontario 2004.
- [42] J. Yin, Q. Yang, L. Ni, "Adaptative Temporal Radio Maps for Indoor Location Estimation", *Proceedings. Third IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, Per Com 2005, pp. 85-94. 2005
- [43] G. Dudek, M. Jenkin, "Computational Principles of Mobile Robotics", *Cambridge University Press*, 2000.
- [44] C. Nerguizian, "Radiolocalisation en milieu minier souterrain", Thèse de doctorat, INRS-SEMT, Aout 2003.
- [45] D. Schnacke, "Applications Supported by Next-Generation 5.9GHz DSRC", *Tranacore ITS world congress*, Madrid 2003.
- [46] M. Schagrin "Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems Initiative", *ITS America Annual Meeting*, Mai 2005.
- [47] S. Ezell, "Intelligent Transportation Systems", *Information Technology & Innovation Foundation*, January 2010



- [48] H. Hartenstein, K. P. Laberteaux. "A Tutorial Survey on Vehicular Ad Hoc Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, pp. 164–171, 2008
- [49] List of V2X related projects worldwide. [En ligne].2014.  
<http://www.itscommunity.eu/cvisproject/en/links>. (Page consultée le 1 Mai 2014)
- [50] Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems (CICAS). [En ligne].2014.  
<http://www.its.dot.gov/cicas>. (Page consultée le 1 Mai 2014)
- [51] L. Doherty, K.S.J. Pister, and L. El Ghaoui, "Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks," *IEEE Conf. on Information Theory and Communications*, pp. 1655-1663, April 2001.
- [52] F. Duquenne, S. Botton, F. Peyret, D. Bétaille, P. Willis, "GPS, localisation et navigation par satellite," *2e édition, Edition Hermes*, 2005.
- [53] Kenney, J.B., "Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States," in *Proceedings of the IEEE* , vol.99, no.7, pp.1162-1182, July 2011.
- [54] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) [En ligne].2015.  
<http://www.nhtsa.gov>.(Page consultée le 1 Mai 2015)
- [55] Z. Sahinoglu, S. Gezici, I. Gvenc, "Ultra-Wideband Positioning Systems: Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols," *Cambridge University Press, New York, NY, USA*. 2011.
- [56] Ekahau inc. [En ligne].2015. <http://www.ekahau.com/wifidesign/ekahau-heatmapper>  
(Page consultée le 1 Oct 2015)
- [57] S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor, Z. Sahinoglu, "Localization via UltraWidebande Radios," *IEEE Signal Processing Magazine*, July 2005.
- [58] DSRC 5GHz: Dedicated Short Range Communication at 5.9 GHz Standards Group. [En ligne].2014. <http://www.iteris.com/itsarch/html/standard/dsrc5ghz.htm>. (Page consultée le 1 Mai 2014)
- [59] "IEEE Std. 802.11-2012, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications," IEEE Std. 802.11, 2012.
- [60] T. Tsuboi, "Wireless Vehicular Network Standard Harmonization," *The 5th Int. Workshop on Communication Technologies for Vehicles, Nets4cars/Nets4trains*, May 2013.

- [61] International Telecommunications Union-Radio communications (ITU-R). [En ligne].2015. <http://www.itu.int/ITU-R> (Page consultée le 1 Oct 2015)
- [62] Global mobile Suppliers Association. [En ligne].2015.<http://www.gsacom.com>. (Page consultée le 1 Oct 2015)
- [63] 3rd Generation Partnership Project. [En ligne].2015. <http://www.3gpp.org>. (Page consultée le 1 Jan 2015)
- [64] Backhaul for Urban Small Cells. [En ligne].2015. [www.smallcellforum.org](http://www.smallcellforum.org). (Page consultée le 1 Jan 2015)
- [65] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)-Overall Description: Stage 2 (Rel. 11), 3GPP Std. TS 36.300 v11.1.0, March. 2012.
- [66] N. Patwari, J. N. Ash, S. Kyperountas, A. O. Hero, III, R. L. Moses et N. S. Correal, "Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 22, No. 4, pp. 54-69, Juillet 2005.
- [67] P. Biswas, Y. Ye, "Semidefinite Programming for Ad Hoc Wireless Sensor Network Localization," *IEEE Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 46-54, April 2004.
- [68] F. Mourad, H. Snoussi, F. Abdallah, C. Richard Anchor-based localization via interval analysis for mobile ad-hoc sensor networks, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.57, pp. 3226-3239, 2009.
- [69] C. Gentile, "Distributed Sensor Location through Linear Programming with Triangle Inequality Constraints" *IEEE Transaction on Wireless Communications*, vol. 6, no. 7, 2007 pp. 2572-2581.
- [70] P. Biswas, T-C. Lian, T.-C.h. Wang et Y. Ye. "Semidefinite programming based algorithms for sensor network localization, " *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol.2, no. 2, pp. 188-220, Mai 2006.
- [71] F. Abdallah, A. Gning, P. Bonnifait, Box particle filtering for non-linear state estimation using interval analysis, *Automatica*, vol. 44, pp. 807-815, 2008.

- [72] B. Anderson, Y. Changbin, B. Fidan, J. Hendrickx, "Rigid graph control architectures for autonomous formations," *Control Systems Magazine, IEEE* , vol.28, no.6, pp.48-63, Dec. 2008
- [73] N. Alsindi et K. Pahlavan, "Cooperative localization bounds for indoor ultra-wideband wireless sensor networks", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2008, Article ID 852509, 13 pages, 2008
- [74] M. Heusch, "Modélisation et résolution d'une application d'aide au déploiement d'antennes radio en programmation par contraintes sur le discret et le continu, " thèse univ. Nantes, 2006.
- [75] S. B. Lazarus, I. Ashokaraj, A. Tsourdos, R. Zbikowski, P. M. Silson, B. A. White; "Vehicle localisation using sensors data fusion via integration of covariance intersection and interval analysis" *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 9, Sept 2007.
- [76] I. Oppermann, M. Hamalainen, J. Iinatti, "UWB Theory and Applications," *John Wiley & Sons Ltd*, 248 pages, 2004.
- [77] J. Li, J. Conan, S. Pierre, "Position Location of Mobile Terminal in Wireless MIMO Communication Systems", *Journal of Communications and Networks*, vol. 9, no. 3, September 2007, pp. 254-264.
- [78] D. Niculescu, B. Nath, "Ad Hoc Positioning System (APS)," *IEEE Conference on Global Communications*, pp. 2926-2931, Nov. 2001.
- [79] ITU-R 5G, [En ligne].2015.  
[https://www.itu.int/net/pressoffice/press\\_releases/2015/27.aspx](https://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2015/27.aspx) (Page consultée le 1 Oct 2015)
- [80] J. Carlson, M. Alles, G. Maher, S. Mazlum, "System and method for predicting location accuracy of mobile unit", *Pub US 2008/0188244*, Aug. 2008.
- [81] S. D. Gordon, R. L. Martin, D. S. Spain, "computationally efficient estimation of the location of a wireless terminal based on pattern matching", *Pub US 2006/0240844*, Oct 2006.
- [82] A. Casati, S. Palat, S. Tatesh, "Method of assigning a mobile unit to a tracking area based on a location update frequency", *Pub US 2007/0232320*, Oct 2007.
- [83] V. Anantha, T. S. Rappaport, E. Reifsnider, R. S Skidmore, "System, Method, and apparatus for determining and using the position of wireless devices or infrastructure for wireless network enhancements", *Pub, US 2006/0019679*, Janv 2006.

- [84] C. Nerguizian, C. Despins, S. Affes "Method and system for indoor geolocation using an impulse response fingerprinting technique", Pub US 2007/0010956, Jan 2007.
- [85] P. Bolliger, "Redpin - Adaptive, Zero-Configuration Indoor Localization through User Collaboration", *International Conference on Mobile Computing and Networking*, San Francisco, USA, Sept 2008.
- [86] P. Bahl, V. N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system", *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 775–784, 2000.
- [87] H. Wymeersch, "Cooperative localisation for wireless networks", *Pub US 2008/0268873*, Oct 2008.
- [88] H. Wymeersch, U. Ferner, and M. Z. Win, "Cooperative Bayesian self-tracking for wireless networks," *IEEE Communication Letter*, vol. 12, pp. 505–507, Jul. 2008.
- [89] M.C. Markót, T. Csendes, "A new verified optimization technique for the packing circles in a unit square problems," *SIAM Journal on Optimization*, vol. 16, pp. 193–219, 2005.
- [90] J. Dattorro "Convex Optimization & Euclidean Distance Geometry" *Edition Meboo*, USA, 808 pages, 2009.
- [91] A. Javanmard, A. Montanari, "Localization from Incomplete Noisy Distance Measurements" *Foundations of Computational Mathematics*, 2012.
- [92] B. Anderson, Y. Changbin, B. Fidan, J. Hendrickx, "Rigid graph control architectures for autonomous formations," *Control Systems Magazine, IEEE* , vol.28, no.6, pp.48-63, Dec. 2008.
- [93] A. Mourikis, "Characterization and optimization of the accuracy of mobile robot localization," Phd thesis, University of Minisota, June 2008.
- [94] T. Wigren, "A polygon to ellipse transformation enabling fingerprinting and emergency localization in GSM," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011.
- [95] T. Wigren, "Clustering and polygon merging algorithms for fingerprinting positioning in LTE", *Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, 2011.
- [96] T. Wigren, "Adaptive Enhanced Cell-ID Fingerprinting Localization by Clustering of Precise Position Measurements," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.56, no.5, pp.3199-3209, Sept. 2007.

- [97] A. Bahr, J. J. Leonard et M. F. Fallon, “Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles”. *International Journal of Robotics Research*, vol. 28, No.6, Juin 2009,
- [98] Jaulin L. “Robust set-membership state estimation, application to underwater robotics,” *Automatica*, vol. 45, pp. 202-206, 2009.
- [99] Drevelle, V. and Bonnifait, P. “A set-membership approach for high integrity height-aided satellite positioning,” *GPS Solutions*, pp. 357–368, 2011.
- [100] Garey, Michael R.; Johnson, David S., “Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness, W. H. Freeman, 1979.

## ANNEXE A - MESURES DE SIGNATURES DU SIGNAL

Nous avons utilisé le logiciel HeatMapper de la compagnie Ekahau [56] qui permet de générer une carte détaillée de la couverture Wi-Fi (prend en charge les normes IEEE 802.11n/a/b/g). Cette carte est générée pour chaque point d'accès Wi-Fi en parcourant sa zone de couverture. Tout d'abord, lors du parcours, la puissance du signal ainsi que sa position sur la carte est enregistrée ; ensuite par utilisation du modèle de propagation et interpolation entre deux points de mesure le logiciel permet de générer une carte de couverture. De plus, le logiciel permet de visualiser le résultat sous forme de plages de couleurs selon un tableau de correspondance bien établi (tableau A.1). Afin d'évaluer l'algorithme CLEF, nous avons effectué des mesures de signatures du signal de plusieurs points d'accès Wi-Fi dans un environnement intérieur, en utilisant le logiciel HeatMapper. Pour ce faire, nous avons installé ce logiciel sur un ordinateur portable avec carte interface Wi-Fi (Atheros AR5007) et avons parcouru le 3e étage du pavillon Lassonde du département GIGL, voire la figure A.1.

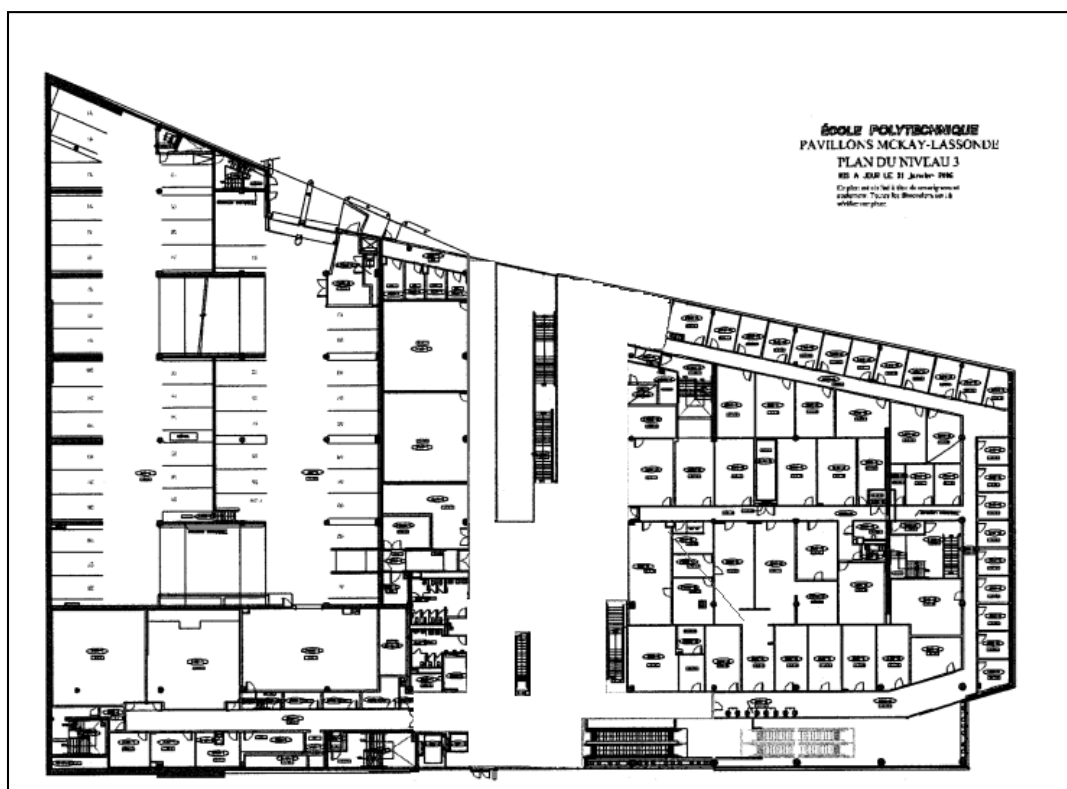


Figure A.1 Plan du 3e étage du pavillon Lassonde utilisé dans HeatMapper

Exemples de relevés des plages de puissances de signal lors d'un parcours sont enregistrés pour chaque point d'accès Wi-Fi, comme montré dans la figure A.2.

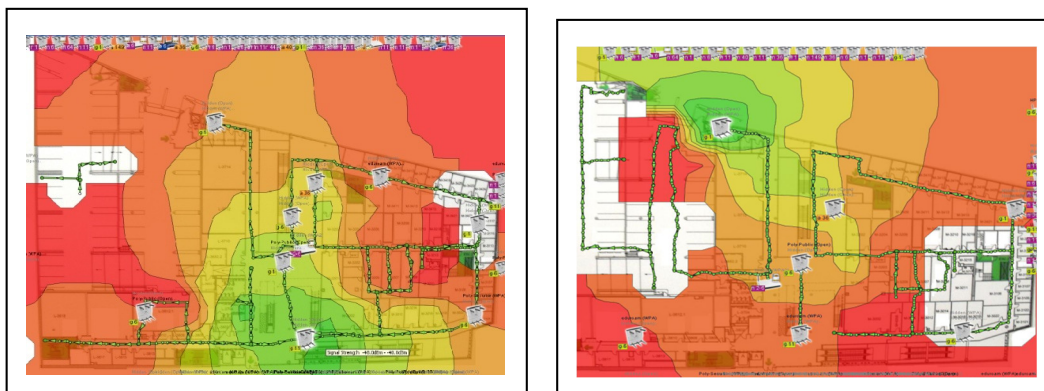


Figure A.2 Exemples de relevés pour deux points d'accès Wi-Fi

Les plages de puissance de signal WiFi et les zones correspondantes définies par le logiciel HeatMapper d'Ekahau.

Tableau A.1 Plages de puissance du signal

Zones	Plages de puissance (dBm)	Zones	Plages de puissance (dBm)
Vert 1	-35 et plus	Jaune	-72 à -64
Vert 2	-40 à -35	Orange 1	-80 à -72
Vert 3	-48 à -40	Orange 2	-88 à -80
Vert 4	-56 à -48	Rouge	-96 à -88
Vert 5	-64 à -56	Blanc	Inférieur à -96